

**Estimativa do fluxo de biogás proveniente do
solo de camada de cobertura de aterro sanitário
para a atmosfera pela técnica da placa de fluxo
estática**

Paulo Henrique Ecco

Orientador: Prof. Armando Borges de Castilhos Jr., Dr.

2010/2

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

ESTIMATIVA DO FLUXO DE BIOGÁS PROVENIENTE DO SOLO
DE CAMADA DE COBERTURA DE ATERRO SANITÁRIO PELA
TÉCNICA DA PLACA DE FLUXO ESTÁTICA

Paulo Henrique Ecco

Trabalho submetido à Banca Examinadora como parte dos
requisitos para Conclusão do Curso de Graduação em En-
genharia Sanitária e Ambiental – TCC II.

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Armando Borges de Castilhos Jr., Dr.
(Orientador)



Iracema de Souza Maia, Msc.
(Membro da Banca)



Kalil Gra T Salim, Eng.
(Membro da Banca)

FLORIANÓPOLIS, (SC)
AGOSTO/2010

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família, pela educação, incentivo e amor sempre demonstrado. Minha mãe Stela, meu pai Jandyr, meu irmão Luiz, aos meus avôs Cosmas e Alma, meus padrinhos Marcelino e Marivani e minha querida tia Lucivani.

Ao Professor Dr. Armando Borges de Castilhos Jr, por toda a orientação direcionada neste período de construção do trabalho e pela preciosa confiança depositada em mim. Também agradeço por ter sido apresentado com esta oportunidade de orientação, pois seu apoio contribuiu para a concretização dos objetivos traçados.

Aos Professores do curso de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), por todas as contribuições técnicas, profissionais e pessoais.

Aos pesquisadores e colegas de laboratório, por toda a amizade durante o trabalho realizado; em especial a Débora Machado, Iracema Maia, Haical Haddad e Kalil Salim.

À engenheira Vanessa Cristina Ferreira Dias, pelo apoio, contribuição intelectual e companheirismo no período de pesquisa.

Aos profissionais do Laboratório Integrado de Meio Ambiente (LIMA).

Ao CNPq, pelo apoio financeiro durante minha pesquisa.

À Proactiva Meio Ambiente, que aceitou a execução desta pesquisa em seu aterro sanitário.

Ao engenheiro Edevaldo Brandílio Reinaldo do Laboratório de Ciências Térmicas, LabTermo, pela composição da placa de fluxo estática.

Ao professor Marciano Maccarini e ao bolsista César do Laboratório de Mecânica dos Solos, pela assistência na realização dos ensaios com os solos dos aterros.

Agradeço também a todos os meus queridos amigos, pelo apoio sincero durante minha trajetória universitária.

ECCO, P. H. **Estimativa do fluxo de biogás proveniente do solo de camada de cobertura de aterro sanitário pela técnica da placa de fluxo estática**. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

RESUMO

Com o objetivo de quantificar as emissões totais do biogás que fluem da camada de cobertura do Aterro Sanitário de Tijuquinhas, o presente trabalho implicou na realização de 15 ensaios de placa de fluxo estática e medição de concentração do gás no contato solo/resíduos, visando avaliar a retenção do biogás pela cobertura e analisar a eficiência de oxidação do gás metano em gás carbônico e água. Também foram realizadas análises do solo de cobertura, com intuito de determinar as características geotécnicas, assim como, os parâmetros físicos do solo e condições meteorológicas que influenciam o fluxo do biogás. Através das amostragens foi possível estimar que a taxa de geração do biogás que escapa pela camada de cobertura está entre $0,95 \times 10^{-4} \text{ g/m}^2 \cdot \text{s}$ e $29,06 \times 10^{-4} \text{ g/m}^2 \cdot \text{s}$, para o CH_4 , e de CO_2 entre $5,22 \times 10^{-4} \text{ g/m}^2 \cdot \text{s}$ e $87,82 \times 10^{-4} \text{ g/m}^2 \cdot \text{s}$. Isso acarreta no valor de $6 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{ano}$ de emissões fugitivas de gás metano pela cobertura, o que corresponde a menos de 7% de toda produção desses gás pelo aterro no ano de 2008. A geração total de biogás que flui pelo solo de cobertura foi de $19,5 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{ano}$. Igualmente, os resultados classificam o solo da cobertura como areia bem graduada com pedregulho e não plástico e apontam uma correlação entre a espessura da camada de cobertura e a densidade de campo, com o fluxo do biogás.

Palavras-Chave: Aterro Sanitário, Fluxo de biogás, Placa de Fluxo Estática.

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CH ₄	Gás Metano
CNPQ	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CO ₂	Gás Carbônico
CO	Monóxido de Carbono
COVs	Compostos Orgânicos Voláteis
ENS	Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental
EPA	Environmental Protection Agency
ESMAP	Energy Sector Management Assistance Program
EUA	Estados Unidos da América
GEE	Gases de Efeito Estufa
H ₂	Gás Hidrogênio
H ₂ S	Gás Sulfídrico
h _{campo}	Umidade do Solo em Campo
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LARESO	Laboratório de Pesquisas em Resíduos Sólidos
LIMA	Laboratório Integrado de Meio Ambiente
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
MCT	Ministério da Ciência e Tecnologia
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
pH	Potencial Hidrogeniônico
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PVC	Policloreto de Vinila
PNSB	Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
SC	Santa Catarina

SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
USEPA	United States Environment Protection Agency
γ_{campo}	Densidade do Solo em Campo
°C	Graus Celsius
°F	Graus Fahrenheit
Σ	Somatória
ρ	Correlação de Spearmann

LISTA DE TABELAS E FIGURAS

Tabela 1	Fases de degradação dos resíduos em um aterro sanitário.	14
Tabela 2	Constituição do biogás encontradas na literatura.	16
Figura 1	Croqui de um Sistema de coleta, oxidação e queima do gás.	19
Figura 2	Área de abrangência dos ensaios de campo.	27
Figura 3	Aterro sanitário de Tijuquinhas ano de 2010.	28
Tabela 3	Quantidade de resíduos depositados no aterro Tijuquinhas .	29
Figura 4	Placa de Fluxo Estática, visão geral e visão lateral respectivamente.	31
Figura 5	Analizador de Gás (drager) e Termômetro digital respectivamente.	32
Tabela 4	Descrição Técnica do Aparato Instrumental.	32
Figura 6	Fixação da Placa de Fluxo e do Tubo de PVC.	33
Tabela 5	Procedimento de leitura dos ensaios na placa.	33
Tabela 6	Parâmetros em questão e suas normas utilizadas.	36
Figura 7	Método do frasco de areia, análise da densidade do solo.	36
Tabela 7	Coefficiente de Spearman.	37
Figura 8	Curva granulométrica do solo estudado.	39
Figura 9	Curva de compactação do solo.	40
Tabela 8	Síntese dos resultados dos ensaios de campo.	42
Figura 10	Relação das concentrações de metano, C/C0.	46
Figura 11	Relação das concentrações de gás carbônico, C/C0.	46
Tabela 9	Correlação de Spearmann encontrada.	48

ÍNDICE GERAL

CAPITULO 1	9
INTRODUÇÃO	9
CAPÍTULO 2	11
OBJETIVOS DO TRABALHO	11
2.1. Objetivo Geral.....	11
2.2. Objetivos Específicos.....	11
CAPÍTULO 3	12
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
3.1. Aterro Sanitário	12
3.2. Biogás de Aterro Sanitário	13
3.3. Constituição de Biogás.....	15
3.4. Biogás x Aquecimento Global.	16
3.5. Fluxo de Biogás pela Camada de Cobertura.	18
3.6. Processo de Oxidação do Metano em Camada de Cobertura	20
3.8. Técnicas para Medição do Fluxo de Biogás em Camadas de Cobertura.....	23
3.8.1 Placa de Fluxo Estática	23
CAPÍTULO 4	27
INVESTIGAÇÃO DE CAMPO	27
4.1. Descrição do Local de Estudo	28
4.2. Descrição do Aparato Experimental	30
4.2.1. Detalhamento da Placa de Fluxo	31
4.2.2. Equipamentos de Medição Utilizados nos Ensaios	31
4.2.3. Fixação e Análise da Placa de Fluxo e do Tubo de PVC	32
4.3. Cálculo do Fluxo de Biogás pela Camada de Cobertura	34
4.4. Estudos de Laboratório	35
4.5. Análise Estatística	36
CAPITULO 5	39
RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	39
5.1. Estudos de Laboratório	39
5.2. Estudos de Campo.....	42
CAPÍTULO 6	50
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	50
6.1 Conclusões	50
6.2 Recomendações.....	51
BIBLIOGRAFIA.....	52
APÊNDICE A	58
APÊNDICE B	60

CAPITULO 1

INTRODUÇÃO

Atualmente, apesar de uma crescente tendência mundial com o intuito de reduzir, reutilizar e reciclar, os aterros sanitários ainda representam a principal forma de destinação final dos resíduos sólidos no mundo. No Brasil existe um número significativo de aterros sanitários, principalmente em regiões mais desenvolvidas como o sudeste e o sul, contudo esse tipo de destinação final é praticamente inexistente no restante do país, (JUCÁ, 2002).

De acordo com Castilhos Jr. e Reichert (2007), essa forma de disposição dos resíduos tem sua grande aplicabilidade em função do seu baixo custo comparado as demais técnicas, além de ter uma fácil execução e um controle na proliferação de vetores. A necessidade de novas áreas capacitadas segundo as legislações locais para implantação dessa obra de engenharia implica atualmente em uma busca por técnicas alternativas para destinação final dos resíduos.

Esse tipo de destinação tem como consequência a produção de efluentes líquidos, o lixiviado e efluentes gasosos, o biogás, que quando não coletados e tratados adequadamente podem ocasionar poluição do meio ambiente em geral. De acordo com Stern et al. (2007), os gases de aterros sanitários são produzidos por degradação anaeróbia microbiana da parte orgânica dos resíduos depositados; os principais componentes desse biogás são o metano (CH_4) e o dióxido de carbono (CO_2), o primeiro com potencial relativamente maior no aprisionamento do calor na atmosfera, fenômeno conhecido como efeito estufa.

Em virtude dessa questão e em razão do Protocolo de Quioto apresentar a possibilidade de países desenvolvidos utilizarem de sistema de redução e limitação de emissão dos gases causadores do efeito estufa, que os aterros sanitários de países em desenvolvimento estão sendo focos de projetos sustentáveis. O mecanismo de desenvolvimento limpo – MDL permite a certificação de projetos de redução de emissões de gases nos países em desenvolvimento e posterior venda aos países desenvolvidos. Segundo o relatório do Ministério da Ciência e Tecnologia, MCT (2010) o Brasil ocupa o 3º lugar em número de projetos de MDL em termos de redução de emissões de gases, com um total de 453 projetos, em segundo lugar a Índia com 1661 projetos e em primeiro em primeiro lugar a China com 2355.

A camada de cobertura em aterros sanitários atua como um divisor entre a massa de resíduos e o ambiente externo. Esse artifício é responsável

por evitar a infiltração de água no solo e a saída direta de gases para a atmosfera, ou seja, atua como item que reduz o potencial de contaminação do ar, bem como o efeito estufa. Segundo o relatório do IPCC (2007), a utilização de uma camada biológica com parte da cobertura final de aterros demonstra ser uma tecnologia eficiente na redução das emissões de CH_4 para a atmosfera, por consequência da oxidação do gás metano em gás carbônico.

Dentro dessa temática, a análise dos processos de decomposição da matéria orgânica em aterros sanitários demonstra ser de enorme importância já que a produção e eliminação livre do biogás é um grave problema para o meio ambiente, tanto em nível local, quanto global. Isso pode ser minimizado seja com a utilização de camadas de coberturas eficientes ou simplesmente com a coleta e queima dos gases de aterros.

Atualmente inúmeras são as metodologias propostas para mensurar as emissões dos gases de aterro que fluem pelos solos de camadas de cobertura de aterro sanitário, com a finalidade de ponderar o comportamento no que se refere à emissão e retenção dos gases. De acordo com Pedersen (2001), a câmara de fluxo é um artifício amplamente utilizado para medição de emissões de gases provenientes desses solos.

Dentro dessa temática o presente trabalho teve como objetivo principal quantificar a contribuição de gases oriundos pela camada de cobertura do aterro sanitário de Tijuquinhas, local que utiliza parâmetros de engenharia com o objetivo de evitar a poluição dos recursos hídricos, solo e da atmosfera. As pesquisas foram desenvolvidas no Laboratório de Pesquisas em Resíduos Sólidos (LARESO), sob a coordenação do professor Dr. Armando Borges de Castilhos Junior, da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

CAPÍTULO 2

OBJETIVOS DO TRABALHO

2.1. Objetivo Geral

O presente trabalho teve como objetivo principal quantificar o fluxo total de biogás proveniente da camada de cobertura do aterro sanitário de Biguaçu/SC.

2.2. Objetivos Específicos

- Determinar experimentalmente o fluxo de biogás proveniente da camada de cobertura do aterro para a atmosfera pela técnica da câmara de fluxo estática.
- Avaliar a eficiência de oxidação do gás metano pela camada de cobertura do aterro.
- Analisar a retenção do biogás, em especial o metano, pela camada de cobertura.
- Verificar a influência da temperatura e dos principais parâmetros do solo, para o fluxo dos gases de aterro.

CAPÍTULO 3

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Em algumas regiões de nosso país o gerenciamento de resíduos sólidos está resumido à coleta e disposição em lixões a céu aberto. Existem várias formas de destinação e tratamento de resíduos urbanos que são comumente escolhidas em função de custo, da área disponível e da necessidade do município. As mais comuns e utilizadas no Brasil são: lixões ou vazadouros a céu aberto, aterros controlados ou aterros sanitários (IBGE, 2000). Essa mesma pesquisa revela que no Brasil a produção diária de resíduos coletados é da ordem de 228.000 toneladas, cerca de 21% vão para lixões, 0,1% são lançados em vazadouros de áreas alagadas, 37% vão para aterros controlados, 36 % para aterros sanitários, 3% vão para estações de compostagem, 1% vão para estações de triagem e 0,45% são destinados à incineração. Desta forma podemos facilmente perceber a problemática existente em nosso país, principalmente porque a maior parte é encaminhada para lixões e aterros controlados, que na verdade não passam de lixões que recebem uma cobertura mínima de terra periodicamente. Importante enfatizar que com a nova pesquisa do IBGE neste ano, índices mais precisos nessa área de saneamento serão conhecidos.

3.1. Aterro Sanitário

Essa obra utiliza técnicas de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos ou riscos à saúde pública e à segurança, minimizando os impactos ambientais. Esse processo emprega princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área e volume possíveis, cobertos por uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho ou a intervalos menores se for necessário. Ferreira (1999) afirma que com o intuito de reduzir os impactos gerados quanto ao aspecto ambiental e de saúde pública, essa técnica tem sido empregada como o processo mais utilizado no mundo para a disposição de resíduos urbanos. O autor assegura que o aterro sanitário é o elemento final de um sistema integrado de gerenciamento de resíduos sólidos.

Maciel (2003) considera que a operação do aterro também influencia os processos de decomposição dos resíduos. A redução do volume dos resíduos por compactação e a utilização de pequenas áreas para um rápido fechamento das células, encurtam a fase aeróbia de decomposição. A compactação dos resíduos apresenta outra vantagem, uma vez que

quanto maior a densidade alcançada com a compactação, mais acentuada é a produção de gás por unidade de volume.

Estudos geológicos e topográficos são fundamentais para escolha da área e verificação do tipo de solo para futura instalação de um aterro sanitário. É uma obra de engenharia que exige um tratamento correto dos seus subprodutos gerados, o lixiviado e os gases de aterro.

Com a coleta e tratamento do lixiviado, depois de realizada a impermeabilização do solo, os líquidos percolados são captados por drenos horizontais e conduzidos para tratamento. A geração de lixiviados geralmente ocorre pelo escoamento superficial e pela infiltração das águas de precipitações; esses líquidos devem ser coletados e devidamente tratados antes de serem lançados em corpos de água, conforme (SALEM et Al. 2008).

Oman e Junestedt (2008) enfatizam em suas pesquisas que a composição do lixiviado é bastante complexa e formada por compostos diversificados, tais como, matéria orgânica, ácidos voláteis, componentes inorgânicos e metais orgânicos. Esses compostos proporcionam a esse líquido gerado um alto potencial de contaminação dos cursos de água próximos de aterros e assim necessitam de tratamentos eficientes. Devido principalmente a essa complexidade do lixiviado, a eficácia dos processos de tratamento, desde projetos mais simples aos mais sofisticados, baseados em processos físicos, químicos e biológicos, para remoção dos contaminantes e adequação aos padrões ambientais de lançamentos nos corpos receptores, são bastante complicados.

Além disso, o aterro sanitário deve prever a recuperação dos gases gerados para evitar sua liberação na atmosfera e sua contribuição para com o aquecimento global e estimular sua possível utilização como fonte de geração de energia térmica e elétrica. De acordo com Tchobanoglous (1993), os aterros sanitários tendem a ser operados com base em procedimentos que provocam a aceleração da decomposição dos resíduos depositados e igualmente ocasiona o aumento da taxa de produção do biogás. A estimativa das emissões de gases que passam pela camada de cobertura é um estudo importante que deve ser realizado pelos aterros, com objetivo de analisar a eficácia de coleta e aproveitamento do biogás pelos drenos de captação e avaliar eficiência da camada de cobertura.

3.2. Biogás de Aterro Sanitário

O biogás ou gases de aterro sanitário são produzidos por degradação da parte orgânica dos resíduos depositados devido a reações bioquímicas

que ali ocorrem. Em geral, as frações dificilmente degradáveis e as inorgânicas não são levadas em consideração nestas estimativas; Tchobanoglous, Thiesen e Vigil (1993) referiram que dentre os principais componentes desse biogás, existe o metano e o dióxido de carbono. As emissões de metano em aterros sanitários ocorrem devido à quebra de compostos de carbono biodegradáveis por bactérias anaeróbias metanogênicas, e a taxa de produção é maior quando a quantidade de resíduos biodegradáveis em aterros são maiores. Esses processos biológicos são bastante sensíveis ao ambiente externo e conseqüentemente existem várias condições naturais e antrópicas que afetarão a população microbiana e, dessa maneira, a geração de biogás, (HUBER-HUMER, RODER e LECHNER, 2009). Neste processo, as concentrações de oxigênio são muito críticas e a complexidade dos resíduos aterrados afeta diretamente as reações biológicas, físico-químicas e conseqüentemente a formação e o fluxo dos gases de aterro.

A origem do biogás de aterro sanitário ocorre por biodegradação dos resíduos depositados, conforme a exposição das etapas cronológicas que seguem na tabela 1 (TCHOBANOGLIOUS, THIESEN e VIGIL, 1993); (CASTILHOS JR. e REICHERT, 2003); (MCBEAN, ROVERS, FARQUAR, 1995).

Tabela 1: Fases de degradação dos resíduos em um aterro sanitário.

Fases	Condição
I	Aeróbia
II	Anóxica
III	Anaeróbia, metanogênica, instável
IV	Anaeróbia, metanogênica, estável

A fase I, exclusivamente aeróbia, existe a presença de oxigênio. Essa etapa se inicia imediatamente após deposição dos resíduos e ocorre enquanto houver presença de O_2 . Água, nitritos e sais de ferro formam os produtos finais dessa etapa (CASTILHOS JR et AL. 2003).

Após a cessão de oxigênio ocorre a decomposição anaeróbia, que formam as etapas seguintes.

Nas fases II e III, fases ácidas, a concentração de CO_2 representa a maior parte dos gases gerados no aterro devido aos processos acidogênicos e acetogênicos, que resultam na formação de ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono (VEEKEN et al. 2000). Park et al. (2001) afirma que a primeira reação química que ocorre durante a degradação da matéria orgânica depositada, transforma essa massa em diversos produtos intermediários como compostos orgânicos voláteis e alcoóis.

Ao final da terceira etapa, metanogênica instável, a população das bactérias metanogênicas começa a se proliferar e crescer, com o início da geração de CH_4 .

A quarta fase do processo, onde há predominância de organismos anaeróbios metanogênicos, ocorre à formação do gás metano com produtos finais formados principalmente por ácidos acéticos e dióxido de carbono; essa fase, caracterizada por ser a mais longa pode durar até 40 anos (ESMAP, 2004).

Já Veeken et al. (2000) a degradação da matéria orgânica em biogás é realizada em quatro partes:

1. Hidrólise: nessa fase o material sólido orgânico presente nos resíduos é complexo e é solubilizado por enzimas excretadas por microorganismos;
2. Acidogênese: fase solúvel aos componentes orgânicos, incluindo os produtos de hidrólise da primeira etapa que são convertidos em ácidos orgânicos e alcoóis;
3. Acetogênese: na terceira etapa, os produtos são convertidos em ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono;
4. Metanogênese: o metano é formado principalmente de ácido acético ou de hidrogênio e dióxido de carbono. O CH_4 também pode ser formado diretamente a partir dos produtos da acidogênese, tais como o ácido fórmico e metanol.

3.3. Constituição de Biogás

O biogás de aterro sanitário é constituído de vários gases e possui uma relação direta com o a característica do resíduo depositado; o gás metano e o dióxido de carbono são os principais constituintes desses compostos, os demais elementos encontrados não devem ser desprezados, apesar de representar uma pequena parcela do composto total, pois podem ser tóxicos e apresentar riscos à saúde pública (MCBEAN, ROVERS, FARQUAR, 1995).

Tabela 2: Constituição do biogás encontradas na literatura.

CH ₄	CO ₂	N ₂	O ₂	Referência
45 - 60	40 - 60	2 - 5	0,1 - 1,0	1
45 - 58	35 - 45	< 1 - 20	< 1 - 5	2
50 - 70	30 - 50	-	-	3
65	35	-	-	4
55 - 65	35 - 45	-	-	5
45 - 60	35 - 50	-	-	6

CH₄ - metano; CO₂ - Dióxido de Carbono; N₂ - Nitrogênio; O₂ gás oxigênio.

[1] Tchobanoglous, Theisen e Vinil (1993); [2] Qian, Koerner e Gray (2002);

[3] Mcbean, Rovers e Farquar (1995) ; [4] Ritzkowski e Stegmann (2007)

[5] Christensen et al. (1996); [6] Gandolla et al. (1997)

3.4. Biogás x Aquecimento Global.

Dentre os gases responsáveis pelo aquecimento global, causado principalmente pelo efeito estufa, o CH₄ representa a segunda maior contribuição para esse fenômeno sobre o clima, (IPCC, 1996). A emissão desenfreada desses gases representa um sério problema a níveis globais, além dos danos acarretados pelo agravamento do efeito estufa. O biogás originado pelos aterros, em função das fugas laterais e superficiais, causa riscos à saúde da população circunvizinhas e compromete o desenvolvimento sadio da vegetação. A ação de ozônio de baixa altitude e a exposição aos constituintes do biogás pode causar câncer ou doenças que afetam o sistema nervoso central (Maciel, 2003).

Estima-se que as emissões de metano de origem antropogênico, correspondem por 70% de todas as contribuições desse gás no mundo e vão de encontro com as contribuições originadas pelo tratamento anaeróbico de efluentes industriais e domésticos, as mais impactantes para o meio ambiente. A concentração de CH₄ na atmosfera teve um acréscimo em torno de 15% desde o início da Revolução Industrial e no final do século XVIII, praticamente triplicou durante os últimos 150 anos, o aumento registrado para o gás carbônico foi da ordem de 35% para o mesmo período. A contribuição dos aterros sanitários no mundo inteiro para produção desse gás está entre 5 e 10 %, (ESMAP, 2004).

Outro agravante provocado pelos gases de aterro em comunidades próximas a esses locais, diz respeito aos odores desagradáveis, o que traz uma qualidade de vida inferior, além da desvalorização das proprieda-

des. Para a instalação dessas obras uma análise criteriosa deve ser feita para a viabilização de áreas, com a procura pelo equilíbrio entre os aspectos sociais, as alterações no meio ambiente e os custos inerentes ao empreendimento. As normas federais e estaduais específicas são vitais para escolha de um novo local a ser instalado aterros sanitários. (HAMADA, 2008).

De acordo com o relatório do IPCC (2007), esses dois gases são classificados como gases de efeito estufa, ou seja, apresentam uma alta capacidade de absorção de radiação infravermelha. No entanto, o CH₄ é um gás com um potencial de aquecimento global 25 vezes maior em relação ao CO₂, ou seja, durante um período de 100 anos o metano é considerado 25 vezes mais eficaz em reter o calor na atmosfera do que dióxido de carbono. IPCC (2001) afirma que a concentração de gás metano na atmosfera está evoluindo 0,6% ao ano.

A utilização adequada dos aterros sanitários com a disposição apenas de resíduos sem valorização, reciclagem, compostagem e com camadas biológicas efetivas podem contribuir para a estabilização dos gases causadores do efeito estufa. Vale ressaltar que mesmo se os acondicionamentos em aterros de resíduos fossem interrompidos agora, o problema do metano gerado nos aterros já existentes continuaria por muitos anos. As possibilidades convencionais de redução do efeito estufa a partir de resíduos em aterros consistem na queima ou combustão dos gases de aterro com recuperação e aproveitamento energético

Ritzkowski e Stegmann (2006) investigaram o procedimento de aeração forçada das células do antigo aterro de Kuhstedt, Alemanha. Por meio da injeção de ar de baixa pressão uniformemente distribuída em toda a massa de resíduos depositada, os pesquisadores analisaram a sustentabilidade de redução de gases causadores do efeito estufa. A pesquisa ponderou 56 amostras de resíduos sólidos, que foram analisadas para os sólidos voláteis e carbono orgânico total. Os resultados expuseram grande redução nas emissões de gases causadores do efeito estufa, em torno de 72% para todo o período de estudo e em torno de 55% somente para o metano no ano de 2006. Muito em função principalmente de situações onde a presença de oxigênio é crítica, as etapas anaeróbias de produção do biogás são convertidos em condições aeróbias e tornam a taxa de produção de CH₄ menores. A intensidade de oxidação do gás metano, depende muito das condições ambientais, concentração de oxigênio, pH, temperatura e do teor de água.

Em contra partida aos relatórios apresentados pelo IPCC e por diversas outras pesquisas que afirmam que a Terra irá passar por um período de

aumento da temperatura global, existem pesquisadores que são contrários a essa vertente. Molion (2008) comenta que esse suposto aumento de 35% na concentração de gás carbônico nos últimos 150 anos, argumentado pelo IPCC (2007), deveria ter impactado um acréscimo na temperatura média da Terra entre 0,5 e 2,0°C, caso os modelos de simulação do clima utilizados atualmente fossem considerados. Entretanto, afirma o pesquisador que segundo o próprio IPCC o acréscimo foi da ordem de 0,4 a 0,7°C, valor conferido no limite inferior do suposto aumento esperado.

Monte e Harrison Hieb, apud Molion (2008), discordam da afirmação que o aumento registrado na concentração de CO₂ nos últimos 150 anos seja conferido às emissões por queima de combustíveis fósseis. Os pesquisadores garantem que mais de 97% do gás carbônico emitido atualmente são de fontes naturais provenientes dos oceanos, vegetação e solos; conferindo as emissões antropogênicas menos de 3%.

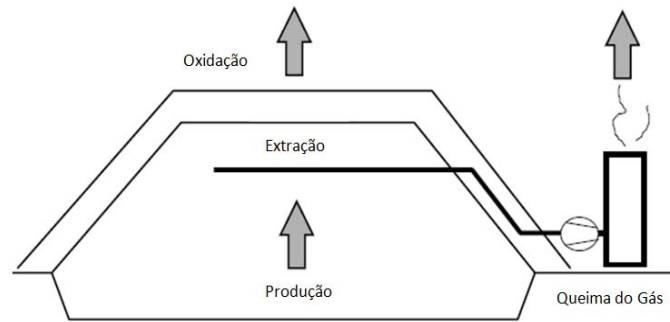
Molion (1996) comenta que os oceanos são os maiores controladores da temperatura do globo, se o fundo dos oceanos aquece, a atmosfera aquece e se o fundo dos oceanos esfria consequentemente a atmosfera também esfria. Para ele o homem só controla 7% da superfície da Terra, enquanto os oceanos cobrem cerca de 71% e esses estão perdendo calor. Segundo o pesquisador, mesmo que o homem atenuie as emissões de gás carbônico, o problema continuará em função da produção natural do carbono chegar a 200 bilhões de toneladas por ano, enquanto o homem emite apenas 6 bilhões de toneladas por ano, o que representa 3% do que é produzido pela natureza. O cientista vai mais afundo e afirma que a Terra irá passar por um período de resfriamento nas duas próximas décadas e que os eventos catastróficos relacionados ao suposto aquecimento global, sempre aconteceram e vão continuar. São apenas ciclos. Para finalizar, o autor afirma que as temperaturas nas cidades têm crescido por conta das chamadas ilhas de calor, caracterizada pela incidência do calor do sol sobre a Terra, que aquece, por exemplo, as construções, as pavimentações asfálticas, o que propicia o aumento geral da temperatura local.

3.5. Fluxo de Biogás pela Camada de Cobertura.

Nos aterros sanitários em geral, a maior parte dos gases que são produzidos podem ser extraídos. O remanescente é potencialmente disponível para emissão pela camada de cobertura. O gás metano da parte remanescente anterior pode ser oxidado através da conversão de CH₄ em CO₂

por bactérias metanotróficas, logo, a emissão final do biogás pode ser esclarecida pela figura abaixo:

Figura 11: Croqui de um Sistema de coleta, oxidação e queima do gás.



Inúmeros são os fatores que afetam a geração e o fluxo dos gases em aterros de resíduos sólidos. Segundo El-Fadel et al. (1997), os fatores mais comuns estão relacionados com a composição, umidade, temperatura, pH da massa de resíduo, disponibilidade de bactérias, nutrientes e presença de agentes inibidores na célula. Além das condicionantes citadas anteriormente, outros aspectos como a geometria e operação do aterro e o ambiente externo à célula também são fatores determinantes na geração e o fluxo de gases. De acordo com o mesmo autor, a altura dos resíduos depositados tem importância durante as fases anaeróbias de formação dos gases de aterro, bem como a impermeabilização das camadas de base. Outro fato citado pelo estudo faz referência às características dos resíduos depositados, sua composição quali-quantitativa compromete a produção dos gases, em função do mecanismo de sua formação ser ocasionado essencialmente pela decomposição de resíduos orgânicos. Logo, quanto maior a quantidade de resíduos orgânico, maior será a produção de gás de aterro.

Heroux e Guy (2005) em seus estudos realizados durante o verão de 2004 na cidade de Montreal, Canadá avaliaram a influência de fatores ambientais para a emissão do gás metano no aterro local. A estimativa aponta para 37 milhões de toneladas de lixo depositadas na localidade, com profundidade máxima de 80 metros e com um sistema de coleta e geração de energia. A partir de uma área de abrangência de 4.800 m², os pesquisadores realizaram 154 testes para correlacionar duas metodologias de medição: Uma trata da placa de fluxo dinâmica e outra do sistema de medição instantâneo, pela utilização do equipamento FID, para verificar estatisticamente a significância da temperatura, umidade, e pressão

atmosférica com o fluxo do gás. Os resultados assinalaram um efeito estatístico bastante significativo para a temperatura e umidade do solo em relação ao fluxo de gás. Com relação à pressão atmosférica, os resultados demonstram que esse fator está na iminência de ter seu peso para o fluxo. Segundo o mesmo estudo, a temperatura foi o fator mais incisivo para o fluxo, com valores da ordem de $T < 20^{\circ} \text{C}$ contribuiu para o aumento das emissões de metano em 91.300 microgramas por segundo. Já com relação à umidade do solo, detectado como o segundo fator mais atenuante no fluxo de gás, teve um efeito positivo de 87.800 microgramas por segundo em emissões de CH_4 . Essa tendência apontada era esperada no estudo feito a partir de solos caracteristicamente seco, pois a diminuição da umidade do solo impulsiona e/ou causa aumento da permeabilidade de gás, ou seja, aumento de fluxo.

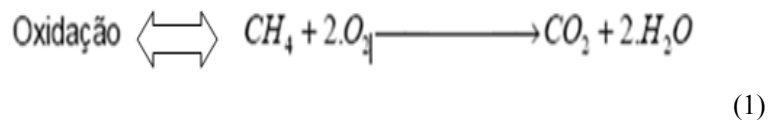
De acordo com a lei de Darcy, para fluidos incompressíveis e em regime laminar sobre meio saturado, a velocidade do fluido (gás), é constante e diretamente proporcional ao gradiente de carga hidráulica e seu coeficiente de proporcionalidade é denominado de coeficiente permeabilidade. Moon et al. (2007) comenta sobre diversos estudos relacionados a permeabilidade, aponta que no caso da água, comparada ou não a solos de camada de cobertura, apresenta permeabilidade 3 vezes menor que a do gás, sendo que o coeficiente de permeabilidade depende das propriedades do meio poroso e da viscosidade do fluido percolante.

Yu e DeLaune (2006) pesquisaram o fluxo de CH_4 e CO_2 pela técnica descrita como teste de coluna, em solos de mangue em Louisiana/EUA, artifício utilizado para estabelecer os perfis de gases. Essa metodologia contribui para identificar as concentrações de gases em perfis de solo e ajuda a localizar a fonte e as fugas desse fluido. As amostragens em diversos pontos de um solo de cobertura são essenciais para entender as atividades microbianas, assim como a distribuição vertical e o movimento horizontal do fluxo de gás de acordo com seus gradientes de concentrações. O projeto empregado pelos pesquisadores foi composto essencialmente de um tubo de PVC de 45 cm de onde foram coletadas amostragens de CH_4 e CO_2 a cada 10 cm de profundidade. Os resultados obtidos demonstraram que a profundidade estipulada é inversamente proporcional a concentração encontrada para ambos os gases.

3.6. Processo de Oxidação do Metano em Camadas de Cobertura

Com características essenciais de ambientes por presença de oxigênio, a oxidação do metano em solos de cobertura de aterros é considerada um

elemento natural, regido pela atuação de bactérias metanotróficas através de processos biológicos, (BORJESSON e AL., 2004). Inúmeros são os parâmetros que afetam a taxa de oxidação do CH₄, dentre eles, Monteiro (2004) cita a temperatura, umidade do solo, concentração de oxigênio e pH. O autor sugere que a temperatura ideal para atuação desses microorganismos varia entre 25-35 °C. Em regiões com clima frio, esses organismos obtêm uma capacidade de adaptação a temperaturas mais baixas e realizam suas atividades normais, (BORJESSON et AL., 2004). A cobertura dessas obras de engenharia funciona com uma tampa biológica para retenção do metano e são compostas por bactérias que apresentam suas atividades segundo a equação abaixo:



Em ambientes aeróbios, o metano será convertido em CO₂ que de acordo com o IPCC (2007), apresenta um poder de retenção de calor na atmosfera 25 vezes menor do que o primeiro gás. Sustenta também que o emprego de uma camada de cobertura biológica com parte da cobertura final de aterros, comprova ser uma metodologia competente para redução das emissões de metano, justamente pelo processo de transformação do gás metano para gás carbônico.

Cabral et al. (2007) afirma que as emissões do gás metano por parte dos aterros sanitários são reduzidas com a utilização adequada de camadas biológicas de cobertura, diminuindo a incidência de bactérias metanotróficas em razão da profundidade atingida pelos aterros. A pesquisa aponta que para os primeiros 40 cm de solo superior, são encontradas quantidades superiores e favoráveis para atuação desses microorganismos.

Stern et al. (2007), desenvolveram suas pesquisas no condado de Leon, Flórida, com o objetivo de constatar a eficácia da oxidação do CH₄ em camadas biológicas de cobertura de aterros, as *biocovers*. Os experimentos consistiram na comparação entre três áreas com camadas regulares de cobertura formadas por areia e argila, com três *biocovers*, cujas composições eram também formadas por um pequeno filete de sucata de vidro sobreposta à uma camada de resíduos de jardim, compostagem e lascas de madeiras. A pesquisa teve duração de 12 meses, sendo que seus idealizadores realizaram seus cálculos a partir dos isótopos estáveis de carbono. Os resultados apontam que nos 3 primeiro meses não houve diferença significativa na oxidação do metano entre os dois estilos de camadas estipuladas. Contudo, durante todo o decorrer do experimento a

biocover tornou-se significativamente mais eficaz na oxidação de CH₄; com média de oxidação de 18% para as células regulares e 38% para as camadas biológicas. Após os três primeiros meses, os pesquisadores relataram que 27% do fluxo de CH₄ foram negativos e 25% do fluxo do mesmo gás apresentaram valores iguais a zero nas células com *biocover*, contra apenas 6% de fluxo negativo e 21% de fluxo zero para as células regulares. Segundo os mesmos estudiosos, fluxos negativos nas camadas biológicas sugerem certa absorção de CH₄ pelo solo e apontam que a espessura e a capacidade de retenção de umidade por essas camadas, formadas por bactérias metanotróficas, provocam maior tempo de retenção para o metano transportado. Esta maior retenção de CH₄ pela *biocover* resultou em uma maior fração oxidada nos seus estudos.

Cabral et al. (2009), estudaram a relação dos isótopos de carbonos estáveis com a eficiência de oxidação de CH₄ em camada biológica de cobertura final de aterro sanitário. Os estudos foram abordados no Canadá, na região do aterro de Saint-Nicéphore, Quebec, a localidade de acondicionamento dos resíduos, caracterizada exclusivamente por resíduos domésticos. Os pesquisadores isolaram duas áreas de 27m², fundamentalmente formadas pela camada de resíduos sobreposta por uma camada de lodo e uma camada em torno de 3 metros de cobertura (0,80 m de substrato, 0,10 m de solo de transição e 2 m de camada de distribuição dos gases). A primeira área foi alimentada por um fluxo externo e controlado de gás. A segunda pelo fluxo normal de degradação dos resíduos aterrados. As paredes laterais em cada um dos dois experimentos foram termicamente protegidas do ambiente externo com painéis de poliestireno de 0,15 m de espessura, com a finalidade de evitar a migração lateral da umidade por caminhos prioritários de fluxo. Os resultados, calculados em função do fator de oxidação denominado f₀, apontaram que para amostras mais superficiais (10 cm), valores com pouca presença de O₂ foram registrados e não extrapolaram os 25% de oxidação. Todavia para as porções com mesma profundidade e sujeitas a níveis de aeração consideráveis, os valores chegaram à casa dos 90%. De acordo com os mesmos estudiosos, o grau de saturação dos gases, temperatura do substrato e intensidade do fluxo afetam a aeração do local. Os resultados também apontam que de acordo com os valores de oxidação do metano encontrado nesses experimentos, as bactérias metanotróficas atuantes estavam presentes em ampla quantidade em regiões menos profundas o que caracteriza uma zona de oxidação situada entre 0,6 - 0,8 metros. Porém a pesquisa aponta que o número médio desses organismos não diminuiu consideravelmente com a profundidade, varia somente as con-

dições ideais de atuação por parte dessas bactérias, temperatura, por exemplo, que diminui com a profundidade.

3.8. Técnicas para Medição do Fluxo de Biogás em Camadas de Cobertura.

Aterros sanitários não são considerados fontes pontuais, mas uma fonte difusa de biogás. Além disso, a emissão tem uma grande variabilidade no tempo e no espaço. Emissões dos gases de aterros podem ser medidas de diferentes modos, o que torna essa tarefa muito difícil. Importante aspecto do cálculo das técnicas é a duração de cada ensaio. Todas as técnicas têm uma duração característica, algumas produzem resultados de emissões com um ponto no tempo, outras dão uma impressão de emissões em um determinado dia e uma terceira categoria apresenta medidas de emissões durante os períodos mensais. Ou seja, a variabilidade do nível de emissão no tempo prevê restrições à metodologia de cada medição utilizada.

De acordo com Schraff et al. (2007), as modelagens empregadas para cálculos das emissões fugitivas de gases de aterro ainda são pouco precisas. É possível estabelecer uma tendência da emissão de biogás para cada um dos aterros sanitários existentes. Porém, essa tendência não pode ser considerada muito adequada para comparar aterros sanitários de diferentes localidades ou para tentar determinar a eficácia das políticas e medidas entre os países; devido principalmente as características específicas de cada local.

Ao longo dos últimos anos um grande número de experimentos para cálculo das emissões foram realizados em aterros de todo o mundo. Estes experimentos mostraram que diferentes técnicas podem ser empregadas, cada uma com as suas especificações positivas e negativas.

3.8.1 Placa de Fluxo Estática

A câmara de fluxo estática é um método amplamente utilizado para medição de emissões de gases provenientes de solos de aterro, as amostras são analisadas por cromatografia gasosa, métodos infravermelhos ou mesmo por equipamentos de medição pontual, (CONEN e SMITH, 2000).

O fato é que não existe uma concordância pelos pesquisadores dessa área quanto o formato ideal de uma câmara de fluxo estática. O volume interno desse objeto está diretamente relacionado à qualidade dos dados

apresentados. Placas com pequenos volumes não possuem seus resultados condizentes, pois a utilização de equipamentos para sucção dos gases durante os ensaios causam uma pressão superior ao fluxo normal do biogás. Por outro lado, placas com dimensões maiores levam a tempos elevados de execução dos ensaios.

Conen e Smith (1998), explicam que o *layout* dessas câmaras influenciava a troca gasosa além de considerar o volume interno um fator preponderante devido a pressão interna que se obtém durante os ensaios. Os autores idealizaram modelos de câmara com “vent tube”, tubos de vento utilizados para regularizar a pressão no interior do equipamento e afirmam, que quanto menor a taxa de emissão superficial e vazão do ar de diluição, maior será a diferença nos resultados sem esse artifício da engenharia. De acordo com o mesmo estudo, placas com dimensões superiores, necessitam de agitadores internos para equalizar o fluxo e aumentar o grau de homogeneização dos gases no interior da placa.

Pedersen (2001) utilizou a técnica da câmara estática para medição das emissões de gases traços. A metodologia consiste em uma análise estatística proposta pelo autor a respeito do acúmulo de gás no interior da câmara, onde o traço do gás é estimado ao longo do tempo. A avaliação das emissões de gases através desse procedimento consiste em duas partes. Na primeira parte foi realizada a medição dos gases traços, onde as mudanças de concentração dentro de um espaço confinado são monitoradas. A segunda parte foi a análise estatística, onde a taxa de emissão foi estimada em função das concentrações dos gases. Através de regressão linear, o pesquisador esperava estimar o fluxo de N_2O , desvio padrão e intervalos de confiança com o emprego do processo da câmara estática sobre um prado de turfa. Foram coletadas 10 amostras com a utilização de seringas específicas (5 ml) em intervalos de 30 minutos cada e posteriormente avaliadas por cromatografia gasosa. Os resultados enfatizaram que as simulações para as hipóteses de regressão linear foram violadas e o teste de significância utilizado não apresentava as propriedades necessárias. O método apresentado pelo pesquisador falhou porque muitas vezes uma condição necessária não foi obedecida o que aponta um erro padrão em seus resultados.

Rayment (2000) avaliou as concentrações de CO_2 oriundas do solo para a atmosfera. O estudo foi realizado na cidade de Vindeln, Suécia. O autor fez uma interpretação teórica de duas técnicas de medição distintas: câmara de gás fechada e por câmara de gás aberta. Por fim, fez uma estimativa prática com 18 amostras por meio da segunda metodologia num solo com característica de arenoso-glacial. Segundo o autor, as

câmaras fechadas impedem a flutuação da pressão atmosférica na superfície do solo e assim reduzem a troca de ar entre o solo e a atmosfera, ou seja, reduzem o fluxo de gás que ocorreria normalmente. Conen e Smith (1998), sugerem a utilização de tubos de vento nesses tipos de câmaras, para regular a pressão interna e externa. Entretanto, em casos com ventos considerados suaves as medições de fluxo de gás em câmaras com tubos de vento se mostram inferiores às sem tubo de vento. Para mensurar o fluxo de CO₂ através dessas técnicas, é fundamental conhecer o volume exato da câmara em questão e assim conseguir estipular o volume necessário nesses objetos para que haja essa diferença de medição entre as câmaras abertas e fechadas, visto que nessa última ocorre influência da pressão nas trocas gasosas e valores de até 30% inferiores são obtidos, (RAYMENT, 2000). Para a segunda parte de seu experimento, os resultados obtidos pelo pesquisador indicam um aumento na concentração de CO₂ com o tempo até atingir um patamar considerado estacionário. Esse ponto ocorre após 300 segundos de ensaio com fluxo de CO₂ da ordem de 8,8 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. De acordo com o perfil de concentrações do gás, durante a fase de crescimento acentuado o comportamento do sistema age como sendo fechado e durante a fase estacionária do perfil o sistema se comporta como sendo um sistema aberto.

Existem ainda diversas tecnologias para a obtenção de amostras de fluxos de gases que fluem pelo solo e dependem do objetivo do estudo, do resultado desejado e das condições de campo.

Scharff et al. (2006) tratam em seus estudo as ferramentas disponíveis para avaliar a produção e a emissão de metano em aterros sanitários. Afirmam que para determinações sobre o destino da utilização de aterros, uma avaliação dos riscos associados à produção de gás é conveniente. Em todo o mundo, implementações estratégicas de gestão de resíduos, políticas e regulamentos que visam à redução da emissão de metano dos aterros estão sendo efetuadas. De acordo com os mesmos autores, a maioria dos modelos de produção de metano é baseada nos resíduos sólidos urbanos encontrados em cada aterro. Eles são, portanto, automaticamente recomendados para ocorrências com quantidades reduzidas de resíduos orgânicos. Na maioria dos eventos, modelos de emissões não são competentes com um número elevado de dados que um aterro realmente produz. Um dos problemas que surgem imediatamente quando um pesquisador aplica-se em um dos modelos atuais é a forma de decompor as diferentes categorias de resíduos registrados no aterro sobre o número limitado de categorias indicadas em cada modelo. Outro fator determinante é o fato que as categorias de resíduos podem variar

entre países; somente para o Catálogo Europeu de Resíduos é estipulado cerca de 800 diferentes categorias de resíduos e essas não são baseadas no teor de carbono, o que dificulta a comparação com categorias de outros países. Mesmo se o teor de carbono de todas as categorias fosse conhecido, não seria fácil utilizar tantos parâmetros em um modelo simples e eficaz, relatam os autores.

Na sequência será detalhada a metodologia para investigação de campo e de laboratório empregada no presente trabalho.

CAPÍTULO 4

INVESTIGAÇÃO DE CAMPO

A pesquisa de campo foi realizada no aterro sanitário de Tijuquinhas, que objetivou os dados necessários para a argumentação técnica na fundamentação do referido trabalho. Primeiramente será descrito o aterro escolhido para a pesquisa, junto com as características da cidade de Biguaçu, local cede do aterro em questão. Em seguida, é descrita a metodologia para o diagnóstico das emissões na camada de cobertura do aterro pela técnica da placa de fluxo estática e pelo tubo de PVC, prontamente com as condições climáticas do local será apresentada.

Nesse sentido foram realizados 15 ensaios de campo, no período de 25/09/2008 a 12/12/2008, com a máxima abrangência da célula número 3 do aterro, uma área em torno de 40.000 m². A célula em questão pode ser visualizada na figura 2, onde a simbologia E1 faz referência ao primeiro ensaio e E15 ao décimo quinto, último procedimento estudado.

A figura abaixo demonstra os lugares georeferenciados onde foram realizados os ensaios de campo. Na direita pode ser visualizada a frente de trabalho, local onde são depositados os resíduos que chegam ao aterro. Os pontos pretos, localizados nos extremos da célula estão os locais de fuga lateral do gás pelos drenos.

Figura 12: Área de abrangência dos ensaios de campo.



Fonte: Dias (2009).

O aterro referenciado é demarcado por três áreas distintas. As duas primeiras com destinação de resíduos até o ano de 2006, tendo em torno de 2 milhões de toneladas de resíduos depositados. A terceira, local de estudo, é a área de disposição atual dos resíduos, caracterizada por estar sobreposta as duas zonas antigas e isoladas por um sistema de impermeabilização, o que proporciona características de um aterro novo para a célula 3.

Em paralelo ao ensaio de placa, também foi realizada medição da espessura da camada de cobertura e medição de concentração e pressão dos gases no contato solo-resíduo com o intuito de determinar a retenção do biogás, em especial o metano, pela camada de cobertura. Por fim, foi efetuada a coleta do solo para determinação dos parâmetros físicos e geotécnicos.

4.1. Descrição do Local de Estudo

O aterro sanitário de Tijuquinhas, figura 3, situado no município de Biguaçu, Estado de Santa Catarina, junto a BR 101 – km 177,6 na localidade denominada Estiva do Inferninho. A cidade de Biguaçu está localizada no litoral central do Estado, a menos de 30 km da capital Florianópolis e integra a Associação dos Municípios da Grande Florianópolis - GRANFPOLIS. A cidade possui clima temperado quente com temperaturas médias que variam entre 15°C e 30°C durante todo o ano. Seus limites territoriais são os seguintes municípios:

- Ao norte com os municípios de Canelinha e Tijucas;
- Ao sul com o município de São José;
- Ao leste com o município de Governador Celso Ramos e o Oceano Atlântico.
- Ao oeste com os municípios de Antonio Carlos e São João Batista.

Figura 13: Aterro sanitário de Tijuquinhas ano de 2010.



Fonte: Google Earth, imagem ano 2010.

O início das atividades ocorreu em 1991 e atualmente os trabalhos são operacionalizados com administração da empresa PROACTIVA meio ambiente. O local recebe resíduos de 21 municípios e apresenta atualmente uma vida útil de apenas mais seis anos, ou seja, até o ano de 2016. No ano de 2008 recebeu uma média de 20.000 toneladas por mês de resíduos aterrados, a tabela 3 apresenta maiores detalhes desses dados.

Tabela 3: Quantidade de resíduos depositados no aterro Tijuquinhas

Ano	Quantidade de resíduos (ton)	Ano	Quantidade de resíduos (ton)
1991	16.179	2000	141.175
1992	64.085	2001	141.093
1993	69.525	2002	181.949
1994	72.336	2003	190.430
1995	82.731	2004	188.980
1996	93.690	2005	236.212
1997	103.529	2006	240.936
1998	121.115	2007	245.755
1999	126.466	2008	250.670
Total			2.566.856

Fonte: Proactiva Meio Ambiente(2007.)

A composição desses resíduos tanto qualitativo quanto quantitativa são variáveis e até certo ponto imprevisível, em função de não existir um controle sistemático, já que divergem de cidade para cidade, inclusive entre os bairros de um mesmo município. Esta variação é função dos diferentes hábitos e costumes da população, da atividade econômica dominante, dos padrões de vida, do clima e também das estações do ano. (BIDONE e POVINELLI, 1999).

Dentre os municípios que utilizam esse aterro para disposição final de seus resíduos, Florianópolis é a cidade com maior contribuição de lixo. Dispõem seus resíduos com produção, entre o lixo convencional e seletivo, em torno de 10.500 t/mês, sendo 10.000 t/mês para o convencional e 500 t/mês para o seletivo (COMCAMP 2002).

O aterro apresenta células sobre o solo impermeabilizado, onde são destinados os resíduos e ao final de cada dia recebem recobrimento de terra para reduzir os maus odores, presença de animais e vetores transmissores de doenças. O sistema de impermeabilização inicialmente era realizado com argila e atualmente possui uma dupla camada de manta PEAD nas células em operação.

O empreendimento possui dois sistemas integrantes na decomposição da massa de resíduos: um sistema de drenagem de gases e um sistema de drenagem e remoção de percolados, biogás e chorume respectivamente. A drenagem dos gases é formada por dois sistemas: vertical e horizontal. O sistema vertical é composto por drenos de 1,5 m de diâmetro, envoltos por telas do tipo telcon, preenchidas por pedras, com um tubo

PEAD perfurado no centro com 0,20 m de diâmetro. O sistema horizontal são drenos executados com PEAD de 0,11 m de diâmetro. Durante o período de pesquisa foi implantado um novo sistema para coleta do biogás produzido, é captado por drenos localizados em torno do aterro e encaminhados para tratamento específico.

O sistema de drenagem de percolados é composto por uma malha de trincheiras em forma de espinha de peixe envolto por uma manta de geotextil, preenchidas com brita de número 04.

O local possui ainda, um sistema de drenagem de águas pluviais composto por drenos temporários e permanentes. Os drenos temporários são valetas situadas nas bermas de corte do aterro e nas camadas de cobertura. Esses escoam as águas pluviais para os drenos permanentes situados entorno do aterro. Os drenos permanentes desviam as águas para quatro caixas, conhecidas como Colchão Reno, que tem a função de dissipação de energia e sedimentação da terra.

Finalmente, o chorume coletado é encaminhado para a estação de tratamento e o gás captado, atualmente ainda é queimado.

4.2. Descrição do Aparato Experimental

A presente pesquisa foi efetuada com o auxílio da técnica conhecida como Câmara/Placa de Fluxo Estática com análise pontual de equipamentos de medição portáteis. Esses objetos têm suas características baseados em sistemas fechados, os gases fluem do solo para o ambiente interno da câmara onde são mensurados sem diluição pelo equipamento de medição e afluem para o interior da placa novamente em um ciclo fechado.

A câmara dinâmica, não utilizada nessa pesquisa, tem seu princípio caracterizado por apresentar uma diluição através de um fluxo ininterrupto de ar injetado no interior da placa com posterior análise pelo equipamento. Diferente da placa estática, no sistema dinâmico ocorre a dispersão dos gases para atmosfera, sistema não fechado. O princípio dinâmico necessita de ensaios com tempos de duração elevados, contudo, a placa estática qualificada por ser um projeto simples e barato foi indicada para utilização do atual trabalho.

Essa metodologia foi empregada dada à disponibilidade de instrumentos conferidos ao estudante, bem como seu menor custo perante outras técnicas. Embora esse procedimento seja amplamente utilizado, existem incertezas sobre o melhor processo para estimar as emissões de gases de aterro por camadas de coberturas. Dentre as vantagens dessa prática

estão o baixo custo, a simplicidade de uso e manuseio. O tempo de ensaio e a obrigação de inúmeros experimentos para obtenção das emissões integrais de um aterro são as desvantagens dessa metodologia.

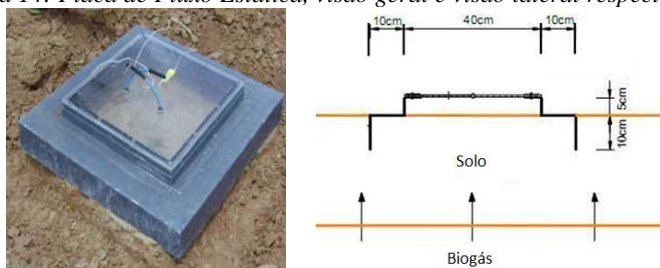
4.2.1. Detalhamento da Placa de Fluxo

A placa de fluxo estática empregada neste projeto foi baseada no método proposto por (MACIEL, 2003), com as seguintes dimensões: 0.60 m x 0.60 m de base externa e 0.40 m x 0.40 m de base interna. A base interna foi utilizada para o cálculo do volume real em cada experimento. Com volume de 0.008 m³ (8L), a câmara foi construída em chapa de aço 1020 de 2 mm de espessura, com visor superficial de acrílico de 10 mm furada e fixada com parafusos em todas as laterais. No acrílico foram efetuados dois furos e fixados conexões de mangueiras para análise das amostragens de gás e pressão caso fosse necessário. No visor de acrílico também é encontrado um termopar tipo K, com a função de obter a temperatura interna e externa.

A figura 4 detalha o objeto utilizado para pesquisa, importante salientar que a altura da placa é composta por dois níveis; o primeiro com 10 cm e o segundo com 5 cm, atributo empregado para evitar maiores erros de medição em função dos ventos que fluem no sentido da placa durante os ensaios.

A comparação do fluxo medido na placa, ou seja, retido pela camada de cobertura é efetuado em relação ao fluxo medido no tubo de PVC, fixado diretamente sobre os resíduos, sem retenção de gás pelo solo.

Figura 14: Placa de Fluxo Estática, visão geral e visão lateral respectivamente.



4.2.2. Equipamentos de Medição Utilizados nos Ensaio

Os equipamentos portáteis respectivamente utilizados para as determinações das concentrações dos diferentes compostos de biogás nessa pesquisa, em especial CH₄ e CO₂ foram:

- Analisador de gás, modelo X 7000 do fabricante Dräger, com limite de quantificação da ordem de 0.1% (v/v).
- Termômetro modelo Imimipar MT 405, instrumento digital portátil, com dois canais de entrada e saída, seu visor em LCD de 3 1/2 dígitos, resolução de 1°C ou 1°F, precisão básica de 0.3% +2°C, realiza medidas de temperatura na faixa de -50°C a 1300°C com uso do termopar tipo K instalado na placa.

O termômetro citado anteriormente apresentou duas funções para o presente trabalho. Foi empregado para mensurar a temperatura externa em cada ensaio, fator esse que foi correlacionado futuramente para a análise estatística dos resultados. Todavia, sua utilização principal se deu no intuito de corrigir as densidades tanto para o gás metano, como também para o gás carbônico analisadas pelo Dräger, com a medição da temperatura interna em cada experimento.

Figura 5: Analisador de Gás (drager) e Termômetro digital respectivamente.



Tabela 4: Descrição Técnica do Aparato Instrumental.

Equipamento	Modelo	Função	Faixa de Medição	Intervalo de medição	Erro de Medição
Drager X-am 7000	Dräger 7000	Analisador de Gás	0 - 100%	0,1%	± 2,0%
Termômetro	Imimipar MT405	Medir Temperatura	-50°C a 1300°C	1°C	0.3%+2°C

4.2.3. Fixação e Análise da Placa de Fluxo e do Tubo de PVC

O procedimento utilizado para fixação da placa e do tubo de PVC além da análise de campo é descrito a seguir e visualizado na figura 6:

- ▶ Primeiramente é colocada a placa no local desejado e demarcado seu perímetro externo (0,60 m x 0,60 m) com uma picareta;
- ▶ Retira-se a placa e escava-se com a picareta uma vala de no mínimo 10 cm de profundidade sobre a linha do perímetro demarcada anteriormente, no sentido para fora da área (0,60 m x 0,60 m) marcada;
- ▶ Após essa escavação, a placa de fluxo é recolocada sobre a vala delimitada;
- ▶ Em seguida, pressiona-se a câmara contra o solo de forma que a cravação seja vertical e com o mínimo de folgas laterais.
- ▶ Finalmente recoloca-se o solo cavado sobre a saia da placa e compacta-se esse solo com o intuito de evitar a fuga de gás pelas “ranhuras”, ou mesmo o acesso de O₂ para o interior da placa.
- ▶ Está pronto para iniciar a medição na placa.

A distância máxima de 1,5 metros do processo de medição na placa cava-se, com o auxílio de uma retroescavadeira, o solo até a camada de resíduos para o procedimento de análise direta na camada de lixo.

- ▶ Primeiramente, mede-se a altura da camada de cobertura e instala-se o tubo de PVC com o bocal adaptado para medição;
- ▶ Fechar o buraco cavado anteriormente com o mesmo solo para monitorar a emissão de gases diretamente da massa de resíduos;
- ▶ Pronto para iniciar a medição no tubo de PVC.

Figura 6: Fixação da Placa de Fluxo e do Tubo de PVC.



Foi adotado como critérios de leitura nos ensaios o procedimento que segue na tabela 5:

Tabela 5: Procedimento de leitura dos ensaios na placa.

Parâmetros analisados	Tempo Inicial (minutos)	Intervalo de medição (minutos)	Tempo Final (minutos)
Temperaturas internas/externas.	0	1	5
Concentrações de CH ₄ , CO ₂ e O ₂	5	5	60
	60	10	120

A medição das concentrações dos gases na câmara tem início de imediato a cravação da placa no solo, esse período é considerado o instante inicial de cada um dos 15 ensaios ($t = 0$). Primeiramente são realizadas leituras a cada 1 minuto durante os primeiros 5 minutos de cada experimento. Em seguida, a cada 5 minutos para os primeiros 60 minutos e por fim o intervalo de 10 minutos até 120 minutos de ensaio ou até o processo estar estável. No apêndice B, encontram-se as planilhas utilizadas para o primeiro e o segundo ensaio, os demais ensaios utilizaram o mesmo processo. Durante cada processo, a temperatura interna e externa a câmara foram medidas de maneira análoga.

As leituras no tubo de PVC foram realizadas no início do processo na placa ($t = 0$) e até estabilizar as concentrações dos gases, muito em função da proposta desse tubo é comparar concentrações e não mensurar fluxo.

Importante salientar que durante as amostragens de algumas coletas de campo, foi obtido concentrações dos gases CO e H₂S que não condizem com a idéia proposta para o projeto e assim não serão discutidas.

4.3. Cálculo do Fluxo de Biogás pela Camada de Cobertura

A partir dos resultados obtidos nos ensaios de campo, foi calculado o fluxo de biogás por meio das equações 1, 2 e 3, proposta por (DIAS, 2009) apud (CZEPIEL et al., 1996).

$$J = \frac{V_p \times \rho_{gás}}{A} \times \frac{\Delta C}{\Delta T} \quad (2)$$

Onde,

- J é o fluxo do gás requerido, determinado em kg/m².s;
- V_p é o volume interno da placa de fluxo (0.008), determinado em m³;
- ρ_{gás} é a densidade do gás a determinada temperatura, em kg/m³;
- A é a área de solo coberta pela placa (0.16), em m²;

- $\Delta C/\Delta T$ é a variação da concentração do gás (% vol) com o tempo (s). Em função do fluxo estimado diminuir com o decorrer do tempo e com o intuito de facilitar a metodologia de cálculo, esse será considerado em termos mássicos ($\Delta M/\Delta T$), conforme apresentado por (MACIEL, 2003) e (DIAS, 2009).

Segue as expressões utilizadas para correção da densidade dos gases em função da temperatura na hora de cada ensaio.

$$\rho_{CH_4}(t) = \frac{\rho_{CH_4}(0^\circ C) \times 273}{(273+t)} \quad (3)$$

Onde,

- $\rho_{CH_4}(t)$ é a densidade de CH_4 em função da temperatura (t), determinada em $^\circ C$;
- $\rho_{CH_4}(0^\circ C)$ é igual a $0,716 \text{ kg/m}^3$.

$$\rho_{CO_2}(t) = \frac{\rho_{CH_4}(t) \times PM_{CO_2}}{PM_{CH_4}} \quad (4)$$

Onde,

- $\rho_{CO_2}(t)$ é a densidade do CO_2 em função da temperatura (t), determinada em $^\circ C$;
- PM_{CH_4} é o peso molecular do CH_4 , igual a 16;
- PM_{CO_2} é o peso molecular do CO_2 , igual a 44.

Os resultados dos ensaios de campo serão apontados no próximo capítulo, contudo foi observado o comportamento da variação mássica com o tempo, tanto para o fluxo de CH_4 como também para o fluxo de CO_2 , valores superiores no início das amostragens. Ou seja, os valores do fluxo devem ser calculados no intervalo inicial de cada ensaio, segundo Maciel (2003) o tempo considerado deve ser em torno de 30 minutos.

4.4. Estudos de Laboratório

No sentido de estudar a influência da umidade e densidade do solo e suas relações com a permeabilidade do solo ao fluxo do gás nas amostragens, foram realizadas coletas e análises em todos os 15 ensaios pelo método do frasco de areia, figura 7.

Já a metodologia utilizada para caracterização geotécnica do solo (limite de liquidez, limite de plasticidade, análise granulométrica, umidade ótima e a massa específica aparente do solo), foi efetuada apenas uma úni-

ca vez, tendo em vista que os solos da camada de cobertura utilizado no aterro provém de um mesmo local e teoricamente possuem as mesmas características.

A tabela 6 apresenta as normas e os parâmetros usados para caracterização do solo em questão. Na sequência é apresentada uma cronologia inicial do método do frasco de areia, empregado para medir a densidade e a umidade do solo em campo.

Tabela 6: Parâmetros em questão e suas normas utilizadas

Parâmetros Analisados	NBR
Densidade do solo em campo	NBR 7185/86
Umidade do solo em campo	NBR 6457/86
Compactação Proctor Normal	NBR 7182/86
Limite de Plasticidade (LP)	NBR 7180/84
Análise granulométrica	NBR 7181/88
Limite de Liquidez (LL)	NBR 6459/84

Figura 7: Método do frasco de areia, análise da densidade do solo.



4.5. Análise Estatística

Inicialmente para relacionar as amostragens de fluxos obtidas com a influência das condições climáticas e de parâmetros físicos do solo, foram consideradas para correlação: temperatura ambiente média mensurada em cada ensaio, densidade do solo e umidade do solo obtida também em cada processo.

O processo aplicado para verificar a influência entre os valores encontrados foi o coeficiente de correlação de postos de Spearman. A fórmula abaixo é usada para designar a força de relação entre duas ou mais variáveis.

$$r = 1 - \frac{6 \sum_i d_i^2}{(n^3 - n)}, \quad (5)$$

Onde,

- $r(\rho)$ é o valor de correlação das variáveis (x,y);
- n é número de pares de variáveis/valores (x,y) relacionadas;
- d_i é (o posto de x_i dentre os valores de x) – (o posto y_i entre os valores de y);

Essa relação é uma medida arbitrária entre duas variáveis quaisquer, sem fazer nenhuma suposição sobre a distribuição de frequência de cada variável. Ela também pode ser usada quando os dados não pertencem a uma escala de medida padrão, mas existe uma ordenação clara, a exemplo do presente projeto.

O coeficiente (ρ) de Spearman varia entre $[-1,1]$. Quanto mais próximo estiver desses extremos, maior será a associação entre as variáveis. O sinal negativo da correlação significa que as variáveis analisadas variam em sentido contrário, isto é, a categoria mais elevadas de uma variável estão associada à categoria mais baixa da outra variável. A tabela 7 exemplifica a argumentação do autor.

Tabela 7: Coeficiente de Spearman

$-1 \leq r \leq 1$
$r(\rho) = 1 \Rightarrow$ correlação perfeita positiva
$r(\rho) = -1 \Rightarrow$ correlação perfeita negativa
$r(\rho) = 0 \Rightarrow$ correlação nula \Rightarrow não existe correlação linear

A comparação entre duas variáveis iguais, os postos de x menos os postos de y serão iguais a 0 (zero) e a correlação será igual a 1 (um).

Para a parte da pesquisa que teve objetivo de estimar o fluxo total de biogás proveniente da camada de cobertura do aterro, a análise estatística ponderou os resultados por meio de uma análise descritiva simples, com médias, desvios padrões e valores mínimos e máximos.

Apesar da influência da pressão atmosférica ou mesmo da pluviometria local, não houve qualquer correção do fluxo do biogás quantificado nos ensaios em função da metodologia proposta não considerar esses dois eventos. Esses dados climáticos demonstram ser de grande importância em projetos que apresentam a finalidade de dimensionar a vazão e a composição do biogás gerado pelos drenos. Nesse caso, deve ser verifi-

cada a influência das condições metereológicas locais com os valores de vazão e concentração dos gases.

CAPITULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O item 5.1 apresentará a caracterização geral e geotécnica do solo da camada de cobertura do aterro sanitário de Tijuquinhas. Em seguida, serão discutidos os resultados de fluxo do gás em cada ensaio e a estimativa total do aterro, bem como as características da camada de cobertura nos locais de ensaio, tais como sua espessura, densidade do solo em campo (γ_{campo}) e umidade do solo em campo (h_{campo}). Por fim, proporcionarei os resultados obtidos da retenção de CH_4 e CO_2 pela camada de cobertura e a análise estatística da influência dos parâmetros com o fluxo.

5.1. Estudos de Laboratório

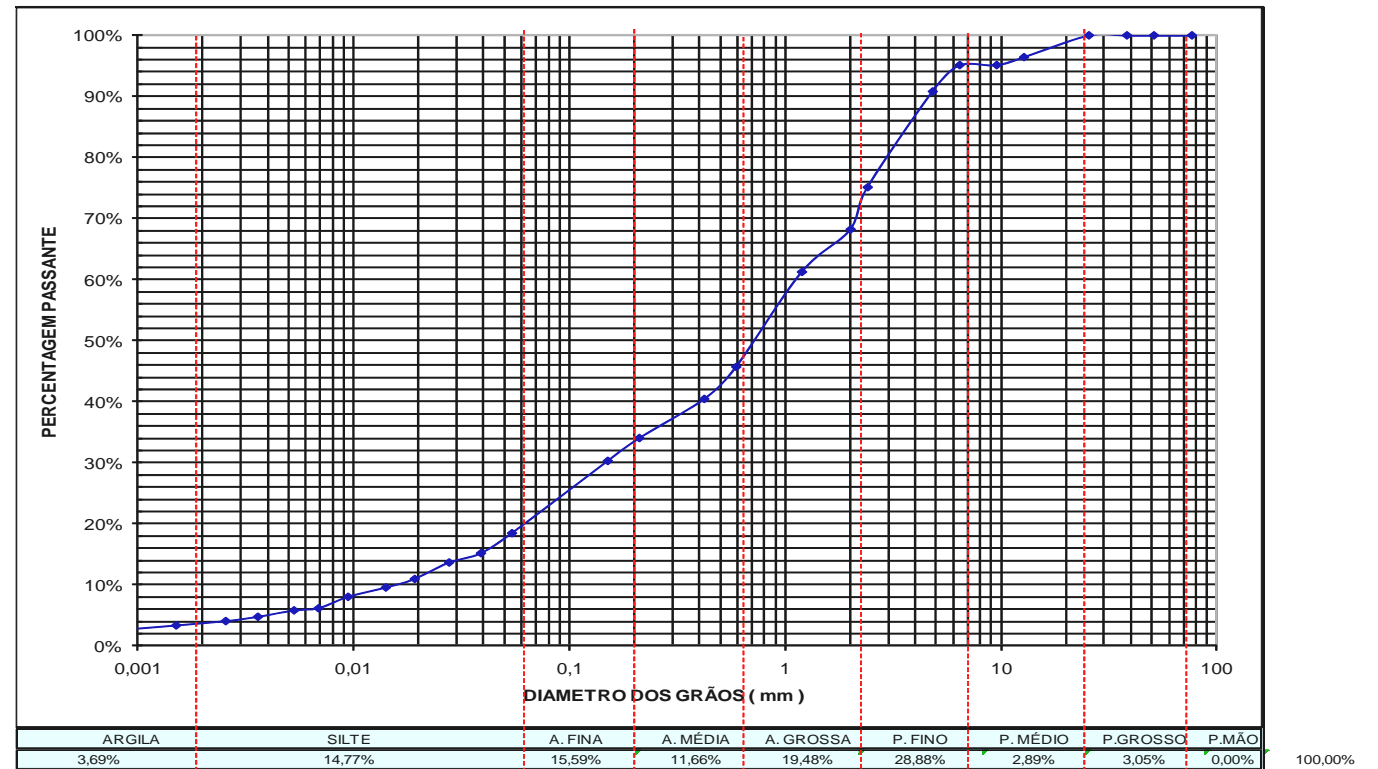
Os ensaios de laboratório tiveram como objetivo principal caracterizar e determinar as propriedades do solo empregado como camada de cobertura do aterro de Tijuquinhas. Atendendo ao rigor que exige uma pesquisa de cunho técnica científica, foram realizadas amostragens com caracterização granulométrica, Proctor Normal para determinar a compactação ideal do solo, limites de consistência além dos índices físicos (umidade e densidade) do solo encontrados em campo.

Na figura 8 pode ser verificada a curva granulométrica do solo utilizado para camada de cobertura. As características do solo encontradas foram de 3,69 % de argila, 14,77% de silte, 15,59% de areia fina, 11,66 % de areia média, 14,48% de areia grossa e 34,8% de pedregulho. Vale ressaltar que essa análise do solo foi realizada apenas uma vez, em razão da procedência do solo ser da mesma jazida. A massa específica real dos grãos também foi verificada nessa análise e apresentou o valor de 2,61 g/cm³.

Foi observado uma pequena quantidade de argila relatada pelo teste. Referido valor está abaixo do encontrado na literatura brasileira, muito em função da diversidade morfológica de nosso país. Mariano (2008) anotou valores entre 20% e 50% de argila em seus experimentos realizados em Recife.

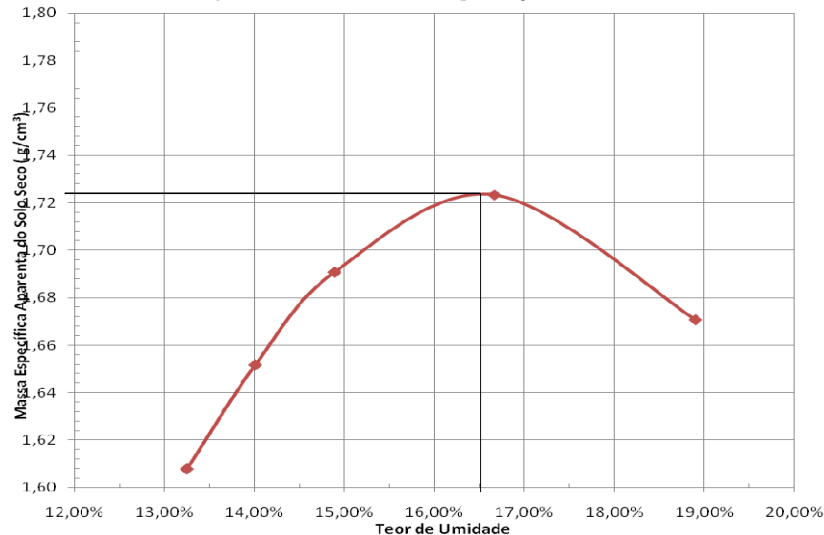
De acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), fica constatado que o solo utilizado pelo aterro na cobertura dos resíduos é qualificado como sendo areia bem graduada com pedregulho e não plástico.

Figura 8: Curva granulométrica do solo estudado.



Para o ensaio de compactação ideal, o método empregado foi o Proctor Normal. Através da curva de compactação foram apontados os valores de densidade específica máxima do solo seco e umidade ótima. Os valores encontrados a partir da compactação do solo em estudo são: densidade máxima do solo seco de $1,72 \text{ g/cm}^3$ e umidade ótima de 16,5%. Tais valores, considerados ideais, proporcionam ao solo uma redução no índice de vazios, o que dificulta o transporte de substâncias, como a emissão de gases.

Figura 915: Curva de compactação do solo



Os valores citados pelo teste acima são os ideais para o solo em questão, porém em alguns ensaios esses valores diferem dos encontrados em campo, ver tabela 8. Os resultados das 15 amostragens tanto para densidade como para umidade, servem para avaliar a influência dos parâmetros do solo na emissão dos gases para o ambiente externo, em função de que solos com estruturas flocluladas apresentam maior contração e permeabilidade que solos com estrutura dispersa. O fluxo do biogás pela cobertura é incitado pelo tamanho, forma e natureza das partículas do solo e pelo modo como estas partículas são arranjadas na sua estrutura. Teoricamente para camadas de coberturas de aterros, valores de umidade próxima ou superiores a umidade ótima, tendem a reter uma maior quantidade de água que ocupam os espaços vazios do solo e por fim tendem a dificultar o fluxo de gás.

Os resultados em sua maioria encontrados para γ_{campo} não divergem muito do ideal acima citado. Logo a camada de cobertura se caracterizou

por apresentar uma resistência à passagem de gás através de sua superfície, entretanto, alguns procedimentos apresentaram valores de densidade que diferem do valor reportado pelo ensaio de Proctor Normal. O ensaio de número 1 (E1), apresentou a menor densidade de campo e apesar de sua umidade ser superior a ótima, teve o maior fluxo de metano mensurado. Para o terceiro ensaio (E3) foi encontrado o valor mais baixo de umidade, com 8.80%, conseqüentemente o terceiro maior valor de fluxo de metano e o quarto maior valor de fluxo de gás carbônico.

O grau de compactação do solo, em geral, foram considerados elevados, logo o percentual de retenção de gases também foi alto, o que indica uma influência do grau de compactação das amostras na retenção do biogás pela cobertura.

5.2. Estudos de Campo

Os resultados para estimativa de fluxo de biogás pela camada de cobertura do aterro sanitário de Tijuquinhas, assim como, os valores da espessura de camada, densidade de campo, umidade do solo e as quantidades finais de metano e gás carbônico em cada ensaio estão compilados na tabela 8.

A elevada área de abrangência de coleta das amostras juntamente com a grande variabilidade de horários de coleta, temperatura, e profundidade da camada de cobertura, foram fatores relevantes para a amplitude dos resultados de fluxo de gás. É de conhecimento geral, que esses gases do aterro sanitário, foram produzidos pela degradação anaeróbia microbiana da fração orgânica dos resíduos depositados, em sua maioria formada principalmente por papel, matéria animal e matéria vegetal.

Ao longo dos anos muitos métodos foram estudados para estimar a quantidade de metano e gás carbônico que fluem pela camada de cobertura dos aterros em pontos específicos no tempo. Como as contribuições das emissões variam significativamente em função dos efeitos nos diferentes parâmetros meteorológicos, foi difícil estimar com exatidão o fluxo de biogás no aterro, objeto deste estudo, ou em qualquer outro local. Ao tentar aumentar a precisão na estimativa desses valores, seja pela utilização de equipamentos com uma maior precisão ou por uma metodologia diferente, outros valores podem ser encontrados.

Os valores para fluxos de CH_4 encontrados estão entre $0,95 \times 10^{-4} \text{ g/m}^2.\text{s}$, no oitavo ensaio e $29,06 \times 10^{-4} \text{ g/m}^2.\text{s}$, para o primeiro ensaio e os de CO_2 entre $5,22 \times 10^{-4} \text{ g/m}^2.\text{s}$, (E9) e $87,82 \times 10^{-4} \text{ g/m}^2.\text{s}$, (E13).

Tabela 8: Síntese dos resultados dos ensaios de campo.

Ensaio	Espessura da camada (m)	γ_{campo} (kN/m ³)	h_{campo} (%)	Fluxo CH ₄ (10 ⁻⁴ g/m ² .s)	Quantidade final de CH ₄ na placa (g)	Fluxo CO ₂ (10 ⁻⁴ g/m ² .s)	Quantidade final de CO ₂ na placa (g)
E1	0,80	13,53	20,40	28,08	1,34	76,77	3,61
E2	1,00	16,70	12,80	0,96	0,04	6,35	0,26
E3	0,55	16,22	8,80	8,13	0,31	29,12	1,10
E4	0,82	16,62	13,40	1,09	0,08	6,04	0,25
E5	0,61	14,94	12,80	3,12	0,13	9,58	0,35
E6	0,50	15,72	16,30	4,31	0,12	22,65	0,71
E7	0,63	16,02	15,90	1,69	0,07	8,88	0,23
E8	0,68	16,10	18,60	0,95	0,02	20,94	0,52
E9	0,71	15,93	18,72	1,33	0,05	5,22	0,19
E10	0,60	15,76	18,80	3,89	0,12	26,51	0,91
E11	0,43	14,88	17,63	5,02	0,21	20,46	0,80
E12	0,44	13,43	15,80	1,45	0,05	14,00	0,51
E13	0,32	14,64	19,60	12,02	0,46	87,82	3,56
E14	0,45	15,32	14,30	6,90	0,22	45,34	1,54
E15	0,31	15,08	17,70	1,53	0,05	9,46	0,26

Em geral os experimentos proporcionaram um comportamento idêntico no decorrer do tempo. Houve aumento da concentração de metano e gás carbônico e diminuição gradativa da concentração de oxigênio. Os gráficos referentes a cada ensaio estão concentrados no apêndice A. Pode ser relatado que a variação máxima de CH_4 ocorreu em sua maioria nos primeiros 30 minutos de ensaio, conforme reportado pela literatura, não ultrapassando a primeira hora em todos os procedimentos e após este período a variação da concentração dos gases, com o tempo, proporcionou taxas decrescentes até a estabilização do mesmo, o que acarretou no fim dos ensaios e consequentemente na concentração medida de biogás no interior da placa.

Em 4 dos 15 procedimentos realizados, não foi necessário a conclusão dos 120 minutos de ensaio, devido a uma estabilização antecipada. Já para outros casos, a exemplo do ensaio de número 1 (E1), onde ocorreu o declínio do fluxo e futura estabilização somente próximo aos 60 minutos, com 22,5% para CO_2 e 23% para CH_4 ; ao final dos 120 minutos foram observados 25% e 25,5%, respectivamente para gás carbônico e para o gás metano.

O decaimento da variação da concentração com o tempo acontece em função de a câmara estática no início do experimento ter uma concentração nula dos gases com gradiente de concentração máximo. No decorrer de todos os ensaios, o volume de gás interno tende a aumentar, logo, sua concentração interna aumenta, seu gradiente de concentração diminui proporcionalmente, e o fluxo de gás é reduzido. Devido também a esse fato e em função da literatura, os valores de fluxo para esse projeto foram calculados nos primeiros 30 minutos de cada experimento.

Comparando-se o fluxo de CH_4 e CO_2 , observa-se que o fluxo de CO_2 é superior ao fluxo de CH_4 , da ordem de até sete vezes e proporcionalmente suas concentrações registras indicam ou valores similares para ambos os casos, ou valores superiores para o gás carbônico. Esse dado, também faz referência a oxidação que ocorre na cobertura.

Esses dados, comparados com a literatura TCHOBANOGLIOUS, (THEISEN e VINIL, 1993), (QIAN, KOERNER e GRAY, 2002), (MCBEAN, ROVERS e FARQUAR, 1995), (RITZKOWSKI e STEGMANN, 2007), (CHRISTENSEN et AL., 1996) que caracterizam o biogás com valores da ordem de 45 à 70% de concentração para o gás metano e 30 à 60% para o gás carbônico, demonstram além de uma retenção física dos gases existentes, uma atenuação biológica do CH_4 , por meio das bactérias metanotróficas, que oxidam parte do CH_4 existente na camada em CO_2 e H_2O .

Ambos os gases são classificados como gases de efeito estufa, IPPC (2007), ou seja, gases que têm um alto potencial de absorção da radiação infravermelha refletida pela superfície da Terra. Tendo em vista que o metano possui um potencial de aquecimento global 25 vezes superior ao gás carbônico em função de seu maior coeficiente de absorção molar de radiação infravermelha e seu tempo de residência na atmosfera, essa camada de cobertura é reconhecida como eficiente para oxidação de CH_4 .

Os resultados para os ensaios E12, E13, E14 e E15 também demonstram a ação desses microorganismos metanotróficos. Esses experimentos caracterizados por apresentar a menor espessura de camada de cobertura, não ultrapassando os 45 cm de profundidade. Outro fator determinante que evidencia a oxidação do metano nesses ensaios, faz relação à época do ano que ocorreu essas 4 investigações de campo, durante os meses de novembro e dezembro, com temperaturas perto dos 30°C , propícias para ação mais eficientes das bactérias metanotróficas. Os valores de quantidades finais encontrados para o CO_2 chegam a ser em até sete vezes superiores aos visualizados para o CH_4 enquanto que para os demais ensaios essa quantia está na média de quatro vezes superiores. Como já referenciado nesse trabalho, conforme Cabral et al. (2007), o número de bactérias metanotróficas diminui consideravelmente com a profundidade, os pesquisadores asseguram que os primeiros 40 cm de solo revelam quantidades superiores e favoráveis para o desempenho desses microorganismos.

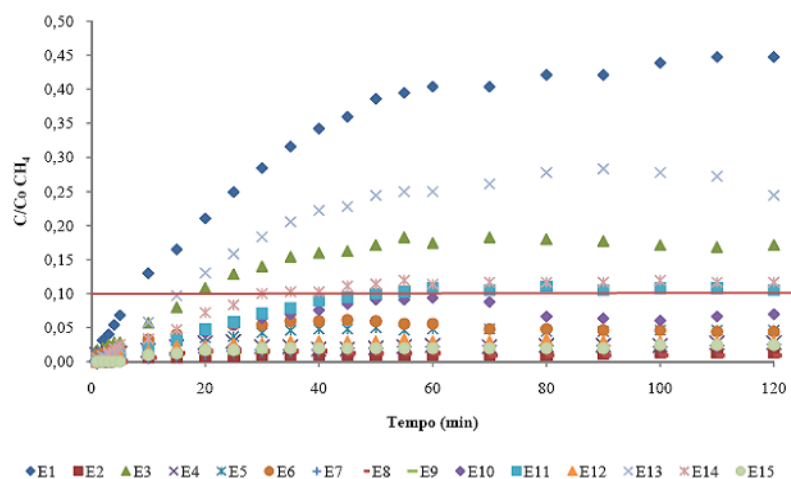
As amostras apresentaram grande variação de massa de metano no interior da placa, esses valores estão apresentados em função da quantia final encontrada em cada ensaio. Os ensaios E2, E4, E5, E6, E7, E8, E9, E10, E12 e E15 obtiveram quantidades finais de CH_4 na placa menores que 0,2 g, tendo o valor mínimo encontrado durante a realização do oitavo ensaio, com 0,02 gramas reportadas. Contudo para os experimentos E1, E3, E11, E13 e E14 obtiveram importância final acima de 0,2 g com valor máximo de 1,3 g para o primeiro ensaio. Já, em relação a quantidade final de massa do gás carbônico encontrada no interior da placa de fluxo em cada experimento, os ensaios E2, E4, E5, E7, E8, E9, E12, E15 apresentaram quantidades finais de CO_2 na placa menores que 0,7 g, com um valor de 0,23 para o sétimo ensaio. No entanto, os ensaios E1, E3, E6, E10, E11, E13 e E14 obtiveram valores finais acima de 0,7 g, com cerca de 3,6 g igualmente relatado pelo primeiro ensaio.

Em relação à alteração da temperatura no decorrer de cada ensaio, não houve um comportamento padrão de variação positiva ou negativa de valores. A temperatura interna da câmara é influenciada pela variação da temperatura externa, pois não existe nenhum separador entre os ambientes interno e externo com tal característica. Foi observado em todos os ensaios, que todas as temperaturas internas foram maiores que as temperaturas externas.

Na realidade, as reações bioquímicas para produção desses gases não procedem de forma homogênea, devido às variações de cada local e as composições específicas de resíduos depositados em cada aterro. O Teor de umidade, proximidade de inibidores e de nutrientes com a temperatura ideal para ação dos microorganismos são fatores importantes para produção desses gases. O biogás é composto predominantemente de metano e dióxido de carbono, porém suas quantificações específicas variam de aterro para aterro. A partir de resíduos que contêm mais gordura e proteína a composição é mais admissível que seja 55% de metano e 45% de dióxido de carbono. O biogás também pode conter traços de outros poliaromático, hidrocarbonetos, hidrocarbonetos halogenados e compostos de enxofre.

A detenção de CH_4 e CO_2 pela camada de cobertura foi obtida através da relação da concentração do gás mensurado nos ensaios de placa de fluxo (C), com a concentração obtida direto da massa de resíduos (C_0), adquirido através dos experimentos com o tubo de PVC. É possível verificar na figura 10, que a camada de cobertura em questão apresentou valores acima de 90% na retenção de metano para quase 70% dos ensaios realizados, o que evidencia a ação do solo na oxidação desse gás.

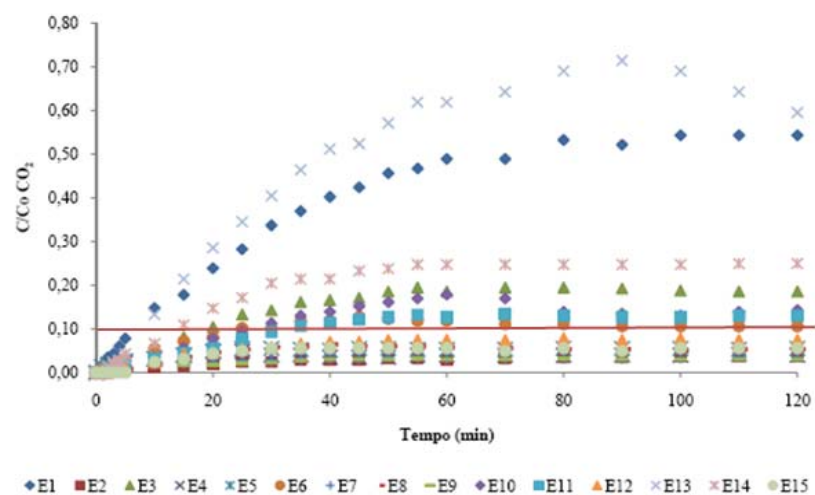
Figura 10: Relação das concentrações de metano, C/C_0



Fonte: Adaptado da dissertação de (DIAS, 2009)

Na Figura 11, observam-se os valores de retenção de CO_2 com valores acima de 90% para 53 % dos ensaios efetuados.

Figura 11: Relação das concentrações de gás carbônico, C/C_0



Fonte: Adaptado da dissertação de (DIAS, 2009)

Com o intuito de quantificar a emissão total do biogás pela camada de cobertura da célula número três, do aterro estudado, local onde foram realizados os 15 procedimentos de placa de fluxo, foi adotado como sendo de 40.000 m² a superfície total. Através de uma análise estatística foi ponderado os resultados do fluxo de CH₄ e CO₂ de cada ensaio por via de uma análise descritiva simples, como médias, desvios padrão e valores mínimos e máximos. Deste modo o valor mediano de fluxo de metano é 3,15 x 10⁻⁴ g/m².s, sendo a densidade desse gás de 0,656 kg/m³, logo, o fluxo total de CH₄ pela camada de cobertura é de 597.424,4 m³/ano ou 6 x 10⁵ m³/ano. Já para o gás carbônico, o valor mediano é da ordem de 19,5 x 10⁻⁴ g/m².s, com densidade de 1,8 kg/m³, assim, o fluxo total de CO₂ pela camada de cobertura é de 13,5 x 10⁵ m³/ano.

Portanto, o fluxo total de biogás (CH₄ + CO₂), oriundo da camada de cobertura da célula 3, do aterro sanitário de Tijuquinhas para atmosfera, no ano de 2008, foi 19,5 x 10⁵ m³/ano.

Dias (2009), em seu estudo, quantificou a estimativa de fluxo total expelido pelos drenos do mesmo aterro, durante o mesmo período. Logo, podemos afirmar que a emissão do gás metano pela camada de cobertura encontrada, representa menos de 7% das emissões totais efetuadas pelo aterro no ano de 2008.

Na tabela 9, pode ser verificada a correlação encontrada pelo método de Spearman, utilizado para análise estatística.

É verificada a correlação de 0,80 entre os fluxos do biogás, o que evidencia uma significância forte entre eles. À medida que o fluxo de CH₄ decresce, o fluxo de CO₂ também decresce.

A espessura da camada de cobertura proporcionou uma importância negativa moderada para ambos os fluxos. Quanto maior foi a profundidade dos resíduos, moderadamente menor será o fluxo esperado. Os ensaios E2 e E4 demonstram o relatado. O segundo experimento apresentou a maior espessura da camada de cobertura, com 1 (um) metro, consequentemente o segundo menor fluxo, de 0,96 x 10⁻⁴ g/m².s de CH₄. O quarto experimento, com espessura de 0,82 metros, relatou o fluxo de 1,09 x 10⁻⁴ g/m².s para o mesmo gás.

A densidade encontrada em campo segue a mesma tendência da espessura de cobertura. Os ensaios E1 e E13 confirmam essa correlação. O primeiro ensaio, verificado o menor valor de densidade de solo, de 13,55 KN/m³, ofereceu o maior fluxo de metano medido do trabalho. O

décimo terceiro ensaio, com $14,64 \text{ KN/m}^3$, apresentou o segundo maior fluxo de metano.

A temperatura, conforme já mencionado anteriormente, não apresentou uma correlação para o fluxo de biogás nos testes realizados. Já a umidade de campo, relatou valores levemente significativos e contrários aos encontrados na literatura.

Importante salientar que o coeficiente de Spearmann é uma medida matemática arbitrária entre duas variáveis quaisquer e não correlacionam os fatores externos, somente as duas variáveis em questão. O ensaio E1, demonstra essa afirmação. Apesar de verificada a segunda maior espessura de cobertura, com 0,80 m (segundo spearmann esse valor proporcionaria um baixo fluxo de gás), entretanto, o ensaio apresentou também a menor densidade de campo, de $13,55 \text{ KN/m}^3$, que de acordo com a mesma correlação, o experimento de número 1 deveria ter um fluxo elevado para o biogás. Isso pode ser visualizado nos resultados desse experimento, onde foi constatado o maior fluxo de metano e o segundo maior fluxo para o gás carbônico.

Tabela 9: Correlação de Spearmann encontrada

Variáveis	Fluxo de CH_4	Fluxo de CO_2
Fluxo de CH_4	1	0,8
Fluxo de CO_2	0.80	1
Espessura da Camada de Cobertura	-0,44	-0,41
Ycampo	-0,53	-0,45
hcampo	0,23	0,33
Temperatura em Cada Ensaio	0,03	-0,08

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo estão apresentadas as principais conclusões obtidas a partir dos estudos realizados e as recomendações apontadas.

6.1 Conclusões

- A caracterização do solo utilizado como cobertura do aterro, constatou que o mesmo é considerado areia bem graduada com pedregulho e não plástico. Seus valores de densidade específica máxima do solo seco são de $1,72 \text{ g/cm}^3$ e umidade ótima de 16,5%. Durante os ensaios foi observado alto grau de compactação do solo, com influência direta para o baixo fluxo registrado;
- O ensaio de placa/câmara de fluxo estática comprovou ser uma metodologia simples e de fácil emprego para a determinação das emissões dos gases pela camada de cobertura do aterro sanitário de Tijuquinhas. Seu *layout*, na forma de degrau, foi considerado eficiente para sua fixação no solo e para evitar maiores influências pela ação do vento nos ensaios. O ponto negativo desse equipamento faz relação ao seu pequeno volume interno, de 8 litros. Valor esse, considerado baixo pela literatura, pode ter afetado alguns resultados de fluxo, devido a provocar uma pressão excessiva imposta pelo equipamento Draguer nas análises de concentração dos gases;
- O tubo de PVC, utilizado para medição de concentração de gás no contato solo/resíduos forneceu informações bastante úteis para o entendimento da retenção do biogás e da oxidação do metano efetuadas na camada de cobertura. O procedimento, também foi útil para descrever a situação dos resíduos do aterro. Esses estão em início de processo de decomposição metanogênica. Foram apurados retenções de CH_4 acima de 90% para 10 dos 15 ensaios realizados e de CO_2 em 8 dos 15 ensaios propostos;
- Os valores para fluxos de CH_4 encontrados estiveram entre $0,95 \times 10^{-4} \text{ g/m}^2.\text{s}$ e $29,06 \times 10^{-4} \text{ g/m}^2.\text{s}$. Já, os fluxos de CO_2 obtidos estiveram entre $5,22 \times 10^{-4} \text{ g/m}^2.\text{s}$ e $87,82 \times 10^{-4} \text{ g/m}^2.\text{s}$. Esses valores correspondem a um fluxo total de biogás pela camada de cobertura de $19,5 \times 10^5 \text{ m}^3$. Menos de 7% das emissões totais, somente para o gás metano, provenientes da degradação dos resíduos no aterro no ano de 2008;
- O fluxo de CO_2 foi maior que o fluxo de CH_4 , na ordem de até sete vezes. Esse dado indica além de uma retenção física do biogás na

cobertura, uma atenuação biológica do metano, por meio das bactérias metanotróficas, que o transformam em gás carbônico e água;

- Os resultados não indicam uma tendência direta, de um aumento do fluxo do biogás com a diminuição da umidade do solo de campo;
- A espessura da camada apresentou uma relação direta, em alguns testes, com a emissão do biogás pela cobertura. Os resultados indicam que a espessura da camada de cobertura e o fluxo foram inversamente proporcionais;
- Os resultados apontam uma relação de aumento da retenção dos gases pela cobertura, com o aumento da densidade de campo encontrada.

6.2 Recomendações

- Utilizar outras técnicas para estimar o fluxo de gás oriundo da camada de cobertura e comparar os resultados com a presente metodologia.
- Mapear as emissões de fluxo de gases pela camada de cobertura;
- Avaliar a permeabilidade do solo ao gás para todos os ensaios realizados;
- Utilizar novas ferramentas estatística para aprimorar o entendimento das variáveis e suas interações com a produção e fluxo de biogás;
- Determinar o fator de oxidação do gás metano na cobertura;
- Utilizar *Biocovers*, para a camada de cobertura final do aterro.

CAPÍTULO 7

BIBLIOGRAFIA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6457: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e caracterização**. Rio de Janeiro, 1986. 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 1984. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, 1984. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7181: Solo - Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 1984. 13p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7182: Solo - Ensaio de compactação**. Rio de Janeiro, 1986. 10p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7185: Solo - Determinação da massa específica aparente, “in situ”, com emprego do método do frasco de areia**. Rio de Janeiro, 1986. 7p.

BÖRJESSON, G.; GALLE, B.; SAMUELSSON, J.; SVENSSON, B. H. **Methane emissions from landfills: options for measurement and control**. In: Proceedings of the Waste 2000 Conference – Waste Management at the dawn of the third millennium, p. 31-40, Warwickshire, outubro 2000.

BÖRJESSON, G.; SUNDH, I.; SVENSSON, B. **Microbial oxidation of CH₄ at different temperatures in landfill cover soils**. *FEMS Microbiology Ecology*, **48**, 305–312, 2004.

BIDONE, F. R. A.; POVINELLI, J. **Conceitos Básicos de Resíduos Sólidos**. São Carlos: EESC-USP, Projeto REENGE, 1999. 109.

CABRAL, A.R.; ARTEAGA, K.; RANNAUD, D.; AIT-BENICHO, S.; POUET, M-F.; ALLAIRE, S.; JUGNIA, L.; GREER, C. **Analysis of methane oxidation and dynamics of methanotrophs within a passive methane oxidation barrier**. International Waste Management and Landfill Symposium, Outubro de 2007.

COMPANHIA MELHORAMENTO DA CAPITAL (COMCAP). **Caracterização física dos resíduos sólidos urbanos de Florianópolis. 2002.** Disponível em <http://portal.pmf.sc.gov.br/entidades/comcap/index.php?cms=caracterizacao+dos+residuos+solidos&menu=6>. Acessado em maio de 2010.

CASTILHOS JR, A. B.; ZANTA, V. M.; LANGE, L. C.; GOMES, L. P.; PESSIN, N. **Resíduos sólidos urbanos: aterro sustentável para municípios de pequeno porte**. Rio de Janeiro: ABES, 2003. 278 p.

CASTILHOS JR, A. B.; REICHERT, G. A. **Projeto, operação e monitoramento de aterros sanitários**. CASTILHOS JR, A. B. (Coordenador). Florianópolis: UFSC, 2007. 92p.

CONEN, F.; SMITH, K. A. **A re-examination of closed flux chamber methods for the measurement of trace gas emissions from soils to the atmosphere**. European Journal Of Soil Science, Institute Of Ecology And Resource Management, University Of Edinburgh, n. 49, p. 701-707, dezembro 1998.

CONEN, F.; SMITH, K. A. **An explanation of linear increases in gases concentration under close chambers used to measure gas Exchange between soil and the atmosphere**. European Journal Of Soil Science, Institute Of Ecology And Resource Management, University Of Edinburgh, n. 51, p. 111-117, março de 2000.

CHRISTENSEN, T. H.; KJELDSSEN, P.; LINDHARDT, B. **Gas-generating processes in landfills**. Landfilling of Waste: Biogas. E&FN Spon Verlag, London, ISBN: 0-419-19400-2, 1996.

DIAS, V. C. F. **Estudo das emissões de biogás nos aterros sanitários de Içara e Tijuquinhas**. Florianópolis, 2009. 115p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental

EL-FADEL, M.; FINDIKAKIS, A. N.; LECKIE, J. O. **Environmental impacts of solid waste landfill**. Journal of Environmental Management, v. 50, n. 1, p. 1-25, 1997.

ENERGY SECTOR MANAGEMENT ASSISTANCE PROGRAM (ESMAP). **The world bank handbook for the preparation of landfill gas to energy projects in Latin America and the Caribbean**. Waterloo, Ontario, 2004.

EPA - U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2007. Disponível em: <http://www.epa.gov/ttn/naaqs/ozone/ozonetech/#emiss>. Acessado em setembro de 2008.

FERREIRA, J. A. **Aterro sanitário: alternativa para disposição de resíduos sólidos**. Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente, UERJ, 1999. 45 p.

HAMADA J. **Aterros sanitários: concepção e dimensionamento**. Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, Departamento de Engenharia Civil, Bauru, 2008. 146p.

HÉROUX, M.; GUY, C.; **Influence of weather parameters on landfill surface emissions**. Proceedings sardinia tenth international waste management and landfill symposium, October 2005, 9 p.

HUBER-HUMER, M.; RODER, S.; LECHNER, P. **Approaches to assess biocover performance on landfills**. Waste Management, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2000**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/>. Acessado em: outubro 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Contagem da população, 2007**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/contagem2007/defaulttab.shtm>. Acessado outubro de 2009.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Guidelines for national greenhouse inventories: reference manual**. Vol.3. 1996 Disponível em: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs6.html>. Acessado em setembro de 2009.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate change 2007: Mitigation of climate change, Contribution Working Group III to the fourth Assessment Report. 2007**. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg3.htm> Acessado em setembro de 2009.

JUCÁ, J. F. T. **Destinação Final de Resíduos Sólidos no Brasil: Situação Atual e Perspectivas**. 10º Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Braga-Portugal 2002.

MACIEL, F. J. **Estudo da geração, percolação e emissão de gases no aterro de resíduos sólidos da Muribeca/PE**. Recife, 2003. 173p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Civil.

MARIANO, O. H. M. **Avaliação da retenção de gases em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos**. Recife, 2008. 232p. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Civil.

MINISTÉRIO DE CIÊNCIA E TECOLOGIA (2010). **Status atual das atividades de projeto no âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) no Brasil e no Mundo - Maio de 2010**. Disponível em: http://www.mct.gov.br/upd_blob/0211/211406.pdf. Acessado em junho de 2010.

MOLION, L.C.B. **Global warming: a critical review**. Revista Geofísica, Instituto PanAmericano de Geografia e Historia, v. 43, n. 2, p. 77-86, 1995

MOLION, L.C.B. **Desmistificando o aquecimento global**. Instituto de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal do Alagoas, 2008. Disponível em: www.alerta.inf.br/files/molion_desmist.pdf. Acessado em julho de 2010.

MONTEIRO, V. E. D. **Análises físicas, químicas e biológicas no estudo do comportamento do aterro da Muribeca**. Recife, 2003. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Pernambuco.

MCBEAN, E. A.; ROVERS, F. A.; FARQUAR, G. J. **Solid waste landfill engineering and design**. Presentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ 07458, 1995. 521p.

ÖMAN, C. B.; JUNESTEDT, C. **Chemical characterization of landfill leachates - 400 parameters and compounds**. Waste Management & Research, v. 28, n. 10, p. 1876-1891, 2008.

PEDERSEN, A. R. **Stochastic diffusion model for estimating trace gas emissions with static chambers**. Soil Science Society of American Journal, v. 65, p. 49-58, 2001.

PORTO, M. F. S.; FREITAS, C. M.; MOREIRA, J.; SISINNO, C. **Uma Abordagem Interdisciplinar Para o Estudo dos Resíduos Sólidos Na Baixada Fluminense**. Porto Alegre, v. 2, n. 2, p. 95-103, 1998.

PROACTIVA MEIO AMBIENTE BRASIL. **Projeto de Captura e queima de gás de aterro sanitário de Tijuquinhas da Proactiva**. Mecanismo de Desenvolvimento Limpo: Documento de Concepção de Projeto. Janeiro, 2007.

QIAN, X.; KOERNER, R. M.; GRAY, D. H. **Geotechnical aspects of landfill design and construction**. New Jersey: Presentice Hall, 2002. 717p.

RAYMENT, M. B. **Closed chamber systems underestimate soil CO₂ efflux**. European Journal of Soil Science, University of Edinburg, n. 51, p.107-110, mar. 2000.

RITZKOWSKI, M.; HEYER, KU.; STEGMANN, R. **Fundamental processes and implications during in situ aeration of old landfills**. Waste Management, v.26, p. 356–372, 2006.

SALEM, Z.; HAMOURI, K.; DJEMAA, R.; ALLIA, K. **Evaluation of landfill leachate pollution and treatment**. Desalination, v. 220, n. 1-3, p. 108-114, 2008.

SCHARFF, H.; JACOBS, J.; OONK, H.; HENSEN, A. **Methods to ascertain methane emission of landfills.** 2007.

STERN, J. C.; CHANTON, J.; ABICHOU, T.; POWELSON, D.; YAN, L.; ESCORIZA, S.; BOGNER, J. **Use of a biologically active cover to reduce landfill methane emissions and enhance methane oxidation.** Waste Management, v. 27, p. 1248-1258, 2007.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; ELIASSEN, R. **Solid Wastes: engineering principles and management issues.** McGraw-Hill Kogakusha, Inc., 1977.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S. A. **Integrated solid waste management: engineering principles and management issues.** McGraw-Hill, Hightstown, NJ, 1993. 978p.

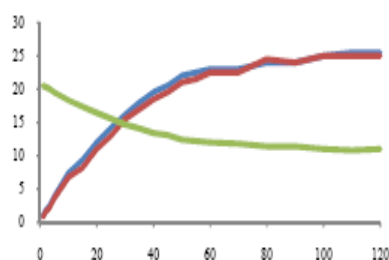
VEEKEN, A.; S. KALYUZHNYI, S.; SCHARFF, H.; HAMELERS, B. **Effect of pH and VFA on hydrolysis of organic solid waste.** Journal of Environmental Engineering, v. 126, p. 1076-1081, 2000.

YU, K.; DELAUNE R. D. **A Modified Soil Diffusion Chamber for Gas Profile Analysis.** Soil Science Society of America Journal, v. 70, p. 1237-1241, 2006.

APÊNDICE A

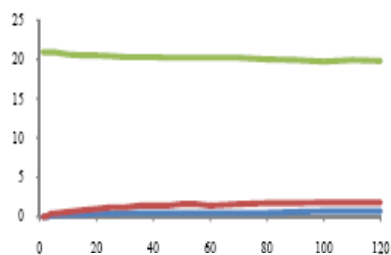
As variações das concentrações de metano, dióxido de carbono e oxigênio com o tempo mensuradas nos ensaios E1 a E15, podem ser observadas a seguir.

Fonte: Dias (2009).



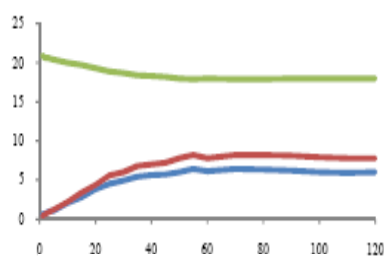
E1: Concentração x Tempo

— CH₄ — CO₂ — O₂



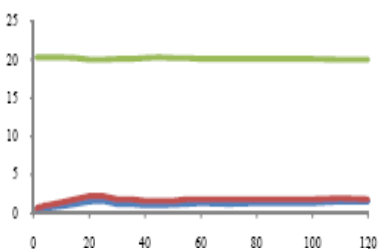
E2: Concentração x Tempo

— CH₄ — CO₂ — O₂



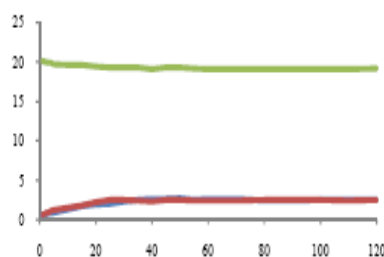
E3: Concentração x Tempo

— CH₄ — CO₂ — O₂



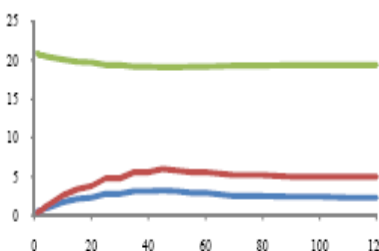
E4: Concentração x Tempo

— CH₄ — CO₂ — O₂



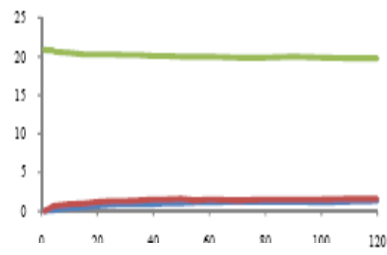
E5: Concentração x Tempo

— CH₄ — CO₂ — O₂



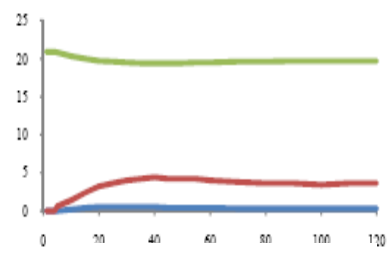
E6: Concentração x Tempo

— CH₄ — CO₂ — O₂



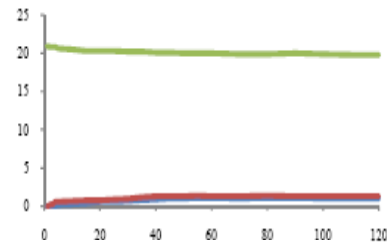
E7: Concentração x Tempo

— CH₄ — CO₂ — O₂



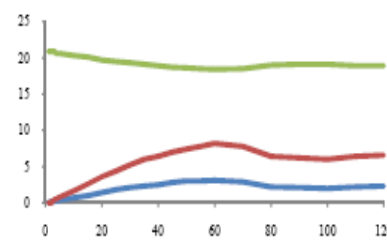
E8: Concentração x Tempo

— CH₄ — CO₂ — O₂

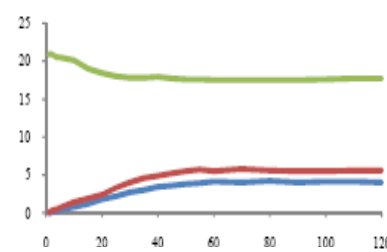


E9: Concentração x Tempo

— CH₄ — CO₂ — O₂

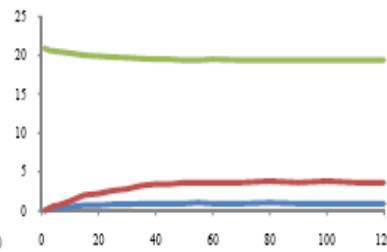


E10: Concentração x Tempo



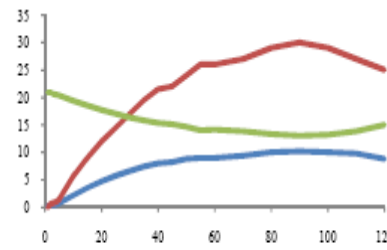
E11: Concentração x Tempo

— CH₄ — CO₂ — O₂



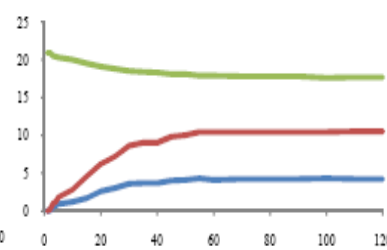
E12: Concentração x Tempo

— CH₄ — CO₂ — O₂



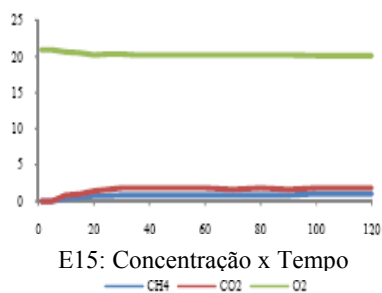
E13: Concentração x Tempo

— CH₄ — CO₂ — O₂



E14: Concentração x Tempo

— CH₄ — CO₂ — O₂



APÊNDICE B

Ensaio Placa de Fluxo (Ensaio - 1)

Data: 25/09/08 Início: 09:30 h Tempo nublado com pouco vento.

Aterro: Proactiva

Coordenadas: 27°21'51,7" 48°38'20,6"

Tempo (min)	Hora	Concentrações					Temperatura (°C)	
		CO ₂	CH ₄	O ₂	H ₂ S	CO	Interna	Externa
0	09:30	0	0	20,9	0	0	27	24
1		0,8	0,9	20,5	0	0	27	24
2		1,6	1,8	20,3	0	0	27	24
3		2	2,3	20,1	0	0	27	24
4		2,8	3,1	19,8	0	0	27	22
5		3,6	3,9	19,5	0	0	28	23
10		6,8	7,4	18,3	0	3	25	22
15		8,2	9,4	17,3	0	4	25	22
20		11	12	16,4	0	5	24	22
25		13	14,2	15,6	0	7	24	21
30		15,5	16,2	14,7	0	9	23	21
35		17	18	14,1	0	10	23	21
40		18,5	19,5	13,4	0	12	22	21
45		19,5	20,5	13,1	0	13	22	21
50		21	22	12,4	0	14	22	21
55		21,5	22,5	12,2	0	15	21	21
60		22,5	23	12	0	15	21	21
70		22,5	23	11,8	0	16	21	21
80		24,5	24	11,4	3	17	21	22
90		24	24	11,4	3	18	21	22
100		25	25	11	4	19	22	22
110		25	25,5	10,8	4	20	24	24
120		25	25,5	11	4	21	25	25

Ensaio Placa de Fluxo - CAP (Ensaio - 1)

Coordenadas: 27° 21' 28" / 48° 38' 20,8"

Altura do cc: 80 cm

Tempo (min)	Hora	Concentrações					
		CO ₂	CH ₄	O ₂	H ₂ S	CO	
0							
10		12,5	14	15,6	0	11	
20							
30		39	44	5	3	31	
60							
90		44	52	2,5	6	37	
120		46	57	0,9	11	43	

Ensaio Placa de Fluxo (Ensaio - 2)

Data: 26/09/08 Início: 10:50 h Tempo nublado

Aterro: Proactiva

Coordenadas: 27°21'52,4" 48°38'18,6"

Tempo (min)	Hora	Concentrações					Temperatura (°C)	
		CO ₂	CH ₄	O ₂	H ₂ S	CO	Interna	Externa
0	10:50							
1		0,4	0,6	20,9	0	4	24	25
2		0,6	0,7	20,6	0	4	25	25
3		0,8	0,9	20,6	0	4	26	25
4		1	1	20,5	0	4	26	24
5		1,2	1	20,4	0	4	25	23
10		2,2	2	20	0	5	24	24
15		3,4	2,8	19,7	0	5	24	24
20		4,4	3,8	19,3	0	6	24	24
25		5,6	4,5	18,9	0	6	24	23
30		6	4,9	18,7	0	7	24	23
35		6,8	5,4	18,4	0	7	25	25
40		7	5,6	18,3	0	7	25	23
45		7,2	5,7	18,2	0	8	25	22
50		7,8	6	18	0	8	29	25
55		8,2	6,4	17,9	0	8	29	25
60		7,8	6,1	18	0	8	30	26
70		8,2	6,4	17,9	0	10	32	23
80		8,2	6,3	17,9	0	10	33	24
90		8,1	6,2	18	0	10	32	25
100		7,9	6	18	0	10	34	27
110		7,8	5,9	18	0	10	34	27
120		7,8	6	18	2	10	32	26

Ensaio Placa de Fluxo - CAP (Ensaio - 2)

Coordenadas: 27° 21' 52,4" / 48° 38' 18,3" Altura do cc: 55 cm

Tempo (min)	Hora	Concentrações					Pressão
		CO ₂	CH ₄	O ₂	H ₂ S	CO	(Pa)
0							
10							
20							
30							
60							
90							
120		42	35	6	23	456	0